



João Collas Valério

Licenciado em Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 Influência do traço, do metacaulino e da cura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Paulina Faria, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rodrigo Gonçalves
Arguente: Professora Doutora Ana Brás
Vogal: Professora Doutora Paulina Faria



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013



João Collas Valério

Licenciado em Engenharia Civil

Argamassas de cal hidráulica natural NHL 3.5 Influência do traço, do metacaulino e da cura

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Paulina Faria, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Rodrigo Gonçalves
Arguente: Professora Doutora Ana Brás
Vogal: Professora Doutora Paulina Faria



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro 2013

“Copyright” João Collas Valério, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Finalizado o meu percurso académico, gostaria de agradecer a todos os que contribuíram directa ou indirectamente na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar, à Professora Doutora Paulina Faria, pela simpatia, total disponibilidade, orientação, auxílio e partilha de conhecimentos desde do início desta dissertação.

Ao Eng.º Vítor Silva e aos técnicos Jorge Silvério e José Gaspar, pelo apoio prestado ao longo da campanha experimental.

À Secil pela disponibilização da NHL3.5 e à IMERYS pela disponibilização do metacaulino.

Aos meus colegas e amigos Gonçalo Lino, Márcio Alves, Cátia Abreu, João Nabais, Tiago Maurício e em especial ao Duarte Vargas, Tiago Madeira, Lara Neves e Pedro Santos pelo apoio e simpatia demonstrados ao longo da campanha experimental.

À Lara pelo apoio e conselhos que me prestou, não só durante a realização deste trabalho mas também fora da vida académica. A sua amizade, carinho e companheirismo certamente me ajudaram a percorrer esta etapa.

Por fim, agradeço à minha família e especialmente aos meus pais, a quem eu dedico esta dissertação, por todo o apoio que me deram ao longo da vida e, particularmente durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Tal como noutros países, o sector da construção é um importante motor do desenvolvimento da economia nacional. No caso português, no entanto, a construção nova tornou-se insustentável do ponto de vista social, económico e ambiental, e, a par de um elevado estado de degradação do património edificado por ausência de manutenção ou simplesmente por se ter atingido o limite de vida dos materiais, assiste-se a uma crescente necessidade de reabilitação e/ou conservação dos edifícios como forma de requalificação das zonas urbanas.

Os revestimentos têm um papel essencial nas condições de habitabilidade, impermeabilidade, estanquidade, isolamento térmico, protecção e durabilidade dos edifícios. Na reabilitação de rebocos, e especialmente na reabilitação de rebocos antigos, é fundamental a escolha de materiais compatíveis com o suporte, para que a solução utilizada seja a mais duradoura possível e para que efectivamente contribua para a protecção do referido suporte.

Com este trabalho, procura-se dar um contributo para a investigação de argamassas compatíveis com os suportes existentes. Assim, produziram-se e caracterizaram-se três argamassas de cal hidráulica natural partindo do traço volumétrico 1:3, entre as quais duas argamassas com substituição de massa do ligante por metacaulino nas percentagens de 2,5% e 5%. As argamassas foram expostas a quatro condições de cura e foram ensaiadas aos 28, 90 e aos 180 dias.

Deste trabalho saem duas conclusões fundamentais. Em primeiro lugar, todas as argamassas estudadas melhoraram tanto o comportamento face à água, como a resistência ao ataque dos sulfatos com o aumento da idade. Por último, e com especial relevância para a reabilitação de edifícios antigos, constata-se que as argamassas com metacaulino apresentam resultados adequados para uso em edifícios antigos, quando expostas a ambiente natural marítimo, corrente em muitas obras, e a ambiente húmido.

Termos chave: Cal hidráulica natural; Metacaulino; Argamassa; Condição de cura; Conservação; Reabilitação.

ABSTRACT

The construction industry is an important driver for the development of the national economy. In the Portuguese case, however, new construction work became unsustainable from social, economic and environmental perspectives. Furthermore, the built heritage has been experiencing increasing levels of degradation either by lack of maintenance or simply because the materials have reached the limits of its lifespan. These two trends are accelerating the need for rehabilitation and / or maintenance of buildings as a mean to recover urban areas as a whole.

Renders play a key role in housing conditions, such as impermeability, thermal insulation, protection and durability of buildings. In the rehabilitation of renders, and especially in the rehabilitation of old render, it is crucial to choose materials compatible with the masonry, so that the solution is more durable and contributes effectively to the protection of the masonry.

This work seeks to contribute to the investigation of mortars and render compatibility. Thus, three types of natural hydraulic lime mortars with 1:3 (binder: aggregate) volumetric trace were produced and characterized. Each one of the three mortars has a different percentage of substitution of lime by metakaolin – 0%, 2,5% and 5%. The mortars were exposed to four different curing conditions and characterized at 28, 90 and 180 days.

As a result, this work reached two main conclusions. Firstly, increasing age improves all mortar's behavior towards water and its resistance to sulfates attacks. Lastly and most importantly, it was found that mortars with metakaolin are suitable for using in older buildings when exposed to marine and humid environments.

Keywords: Natural hydraulic lime; metakaolin; mortars; cure conditions; conservation; rehabilitation

ÍNDICE DE TEXTO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e Enquadramento	1
1.2. Objectivos e metodologia	2
1.3. Estrutura e Organização do Texto	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1. Matérias-primas	5
2.1.1.Ligante – Cal Hidráulica	5
2.1.2.Agregado – Areias	6
2.1.3.Pozolana – Metacaulino	7
2.2. Argamassas.....	7
2.2.1.Exigências Funcionais	7
2.2.2.Algumas Características de Argamassas de Cal Hidráulica	10
2.3. Características de Argamassas de Cal Hidráulica Natural Segundo a Versão em Vigor da Norma	11
3. CAMPANHA EXPERIMENTAL	15
3.1. Constituintes das Argamassas	15
3.1.1.Areia.....	15
3.1.2.Cal Hidráulica Natural.....	17
3.1.3.Metacaulino.....	18
3.2. Suportes.....	19
3.3. Argamassas.....	20
3.3.1.Amassaduras.....	21
3.3.2.Caracterização das Argamassas no Estado Fresco.....	22
3.3.3.Execução dos Provetes	28
3.3.4.Condições de Cura	31
3.4. Ensaio de Caracterização de Argamassas Endurecidas	33
3.4.1.Caracterização dos Provetes Prismáticos de Argamassas	33
3.4.2.Caracterização de Provetes de Argamassa sobre Suporte de Tijolo.....	68
3.5. Rebocos Aplicados na Estação de Exposição Natural de Revestimentos	76
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	83
4.1. Estado Fresco	88
4.2. Resistências Mecânicas.....	89
4.3. Comportamento à Acção da Água	91
4.4. Resistência à Tracção por Flexão e ao Ataque dos Sulfatos	94
4.5. Condutibilidade Térmica.....	97
4.6. Classificação Segundo a Norma EN 998-1 e a gama para edifícios antigos	99

4.7. Comparação com Resultados de Outros Trabalhos	101
5. CONCLUSÕES.....	107
5.1. Conclusões Gerais	107
5.2. Desenvolvimentos Futuros	108
BIBLIOGRAFIA	110
ANEXOS.....	117
Anexo I – Ficha técnica da cal NHL3.5.....	119
Anexo II – Ficha técnica do metacaulino.....	121
Anexo III – Dados climáticos da câmara de cura húmida.....	123
Anexo IV– Resultados individuais	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Curva granulométrica das areias e da mistura	16
Figura 3.2 – Areias: a) APAS 12; b) APAS 20; c) APAS 30.....	16
Figura 3.3 – Cal hidráulica natural	17
Figura 3.4 – a) Preenchimento do recipiente; b) Recipiente preenchido; c) Recipiente rasado	18
Figura 3.5 – Metacaulino	19
Figura 3.6 – a) Pesagem dos constituintes; b) Homogeneização dos constituintes	21
Figura 3.7 – a) Constituintes homogeneizados na cuba; b) Introdução de água na cuba.....	22
Figura 3.8 – a) Compactação; b) Molde rasado; c) Medição	22
Figura 3.9 – Resultados da consistência por espalhamento	23
Figura 3.10 – a) Rasagem da superfície; b) Preparação do conjunto para o ensaio; c) Conjunto com peso de 2 kg.....	24
Figura 3.11 – Retenção de água.....	25
Figura 3.12 – Molde com argamassa no estado fresco	26
Figura 3.13 – Resultados da massa volúmica no estado fresco	26
Figura 3.14 – Equipamento para determinação do teor de ar.....	27
Figura 3.15 – Resultados do teor em ar das argamassas no estado fresco	28
Figura 3.16 – a) Máquina de compactação; b) Colocação da argamassa no molde; c) Moldes rasados	29
Figura 3.17 – a) Colocação do tijolo no molde; b) Afastador	30
Figura 3.18 – a) Rasamento da superfície; b) Tijolo preparado	30
Figura 3.19 – Cura marítima: a) Provetes prismáticos; b) Provetes em suporte de tijolo	31
Figura 3.20 – Cura húmida (H)	32
Figura 3.21 – Cura <i>standard</i> (S).....	32
Figura 3.22 – Cura <i>Spray</i>	33
Figura 3.23 – Diagrama dos ensaios de caracterização dos provetes prismáticos	34
Figura 3.24 – Equipamento “Zeus Resonance Meter”.....	35
Figura 3.25 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas nas curas M, S e H ensaiadas aos 28, 90 e aos 180 dias.....	37
Figura 3.26 – Ensaio de resistência à tracção por flexão	39
Figura 3.27 – Resistência à tracção por flexão das argamassas em curas M, S e H aos 28,90 e 180 dias	40
Figura 3.28 – Ensaio de resistência à compressão.....	42
Figura 3.29 - Resistência à compressão das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias	43
Figura 3.30 – a) Aplicação da película aderente; b) Disposição dos provetes na caixa; c) Pesagem ...	46

Figura 3.31 – Valor assintótico VA e coeficiente de capilaridade CC a partir da curva de absorção de água	47
Figura 3.32 – Coeficiente de capilaridade das argamassas nas curas M , S e H aos 28, 90 e aos 180 dias.....	47
Figura 3.33 – Valor assintótico das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias	48
Figura 3.34 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias.....	49
Figura 3.35 – Ensaio secagem	53
Figura 3.36 – Taxa de secagem e curva de secagem	53
Figura 3.37 – Taxa de secagem das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias	54
Figura 3.38 – Índice de secagem das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias	56
Figura 3.39 – Condutibilidade térmica em provete prismático	58
Figura 3.40 – Condutibilidade térmica dos provetes prismáticos de argamassas nas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias.....	59
Figura 3.41 – a) Imersão dos provetes; b) Colocação dos provetes no estrado metálico	60
Figura 3.42 – Percentagem mássica retida das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias.....	61
Figura 3.43 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 28 dias.....	62
Figura 3.44 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 90 dias.....	62
Figura 3.45 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 180 dias.....	63
Figura 3.46 – a) Provetes em vácuo; b) Provetes submersos	64
Figura 3.47 – a) Pesagem hidrostática; b) Remoção do excesso de água; c) Pesagem saturada	64
Figura 3.48 – Porosidade aberta das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias	65
Figura 3.49 – Massa volúmica das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias	67
Figura 3.50 – Ensaio de condutibilidade térmica a provetes em suporte de tijolo	69
Figura 3.51 – Condutibilidade térmica dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias.....	70
Figura 3.52 – a) Esquema da marcação dos pontos; b) Realização do ensaio.....	71
Figura 3.53 – Velocidade de propagação de ultra-sons dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28 e 90 dias	71
Figura 3.54 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten.....	72
Figura 3.55 – Coeficiente de absorção aos 60 min dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias	73
Figura 3.56 – Coeficiente de absorção aos 5 min dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias	75
Figura 3.57 – Cofragens assentes no terreno nivelado e desmatado.....	77
Figura 3.58 – Fabrico do betão utilizado nas sapatas	77

Figura 3.59 – Betonagem das sapatas	78
Figura 3.60 – Sapatas em estado endurecido.....	78
Figura 3.61 – Assentamento de tijolos	78
Figura 3.62 – Aspecto final dos muretes	78
Figura 3.63 – Implantação do parque de muretes; indicação do murete utilizado.....	79
Figura 3.64 – Murete dividido antes da aplicação das argamassas.....	79
Figura 3.65 – Fabrico da argamassa	80
Figura 3.66 – Execução do Salpisco	80
Figura 3.67 – Aplicação da segunda camada de reboco e acabamento.....	80
Figura 3.68 – Análise visual dos rebocos sete dias depois de aplicados	81
Figura 4.1 – Comparação entre espalhamento e massa volúmica	88
Figura 4.2 – Comparação entre espalhamento e teor em ar	88
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção e à compressão.....	90
Figura 4.4 – Valor assintótico, porosidade aberta e índice de secagem	92
Figura 4.5 – Parâmetro AB em todas as idades	93
Figura 4.6 – Coeficiente de absorção aos 5 minutos e aos 60 minutos	94
Figura 4.7 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 28 dias	96
Figura 4.8 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 90 dias	96
Figura 4.9 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 180 dias	96
Figura 4.10 – Comparação entre perda de massa e retenção de sais aos 90 dias.....	95
Figura 4.11 - Comparação entre perda de massa e retenção de sais aos 180 dias	95
Figura 4.12 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons provetes em suporte de tijolo aos 28 dias	97
Figura 4.13 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons provetes em suporte de tijolo aos 90 dias	97
Figura 4.14 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolo aos 28 dias.....	98
Figura 4.15 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolo aos 90 dias.....	98
Figura 4.16 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolo aos 180 dias.....	99
Figura 4.17 – Módulo de elasticidade das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk em todas as curas e a todas as idades	102
Figura 4.18 – Resistência à tracção das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk em todas as curas e a todas as idades	102
Figura 4.19 – Resistência à compressão das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk em todas as curas e a todas as idades.....	102

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Funções e exigências funcionais de diferentes de cada tipo de argamassa	8
Quadro 2.2 – Requisitos dos rebocos a usar em edifícios antigos	10
Quadro 2.3 – Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido segundo a norma EN 998-1	10
Quadro 2.4 – Resistências mecânicas de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR	12
Quadro 2.5 – Absorção de água por capilaridade de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR	13
Quadro 2.6 – Secagem de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR	13
Quadro 2.7 – Valores do ensaio de tubos de Karsten por Lino	14
Quadro 2.8 – Valores do ensaio de tubos de Karsten aos 90 dias por Fontes	14
Quadro 3.1 – Baridade das areias e da mistura de areias	16
Quadro 3.2 – Composição química e superfície específica da NHL 3.5	17
Quadro 3.3 – Baridade da NHL e do Mk	18
Quadro 3.4 – Composição química e superfície específica do Mk	19
Quadro 3.5 – Caracterização do tijolo furado	19
Quadro 3.6 – Massa dos constituintes utilizados em cada argamassa	20
Quadro 3.7 – Traços ponderais, volumétricos e relação água/ligante	21
Quadro 3.8 – Organização e designação dos provetes prismáticos	29
Quadro 3.9 – Organização e designação dos provetes de argamassa sobre suporte de tijolo	31
Quadro 3.10 – Caracterização de provetes prismáticos no estado endurecido.....	34
Quadro 3.11 – volúmica aparente em estado seco.....	36
Quadro 3.12 – Caracterização de provetes de argamassa sobre suporte de tijolo no estado endurecido.....	69
Quadro 4.1 – Síntese de resultados dos ensaios realizados às argamassas em estado fresco.....	83
Quadro 4.2 – Síntese de resultados dos ensaios realizados aos provetes prismáticos	84
Quadro 4.3 – Síntese de resultados dos ensaios realizados aos provetes em suporte de tijolo	86
Quadro 4.4 – Classificação das argamassas segundo a norma EN 998-1	99
Quadro 4.5 – Verificação dos requisitos definidos por Veiga.....	100
Quadro 4.6 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas e as de Grilo.....	103
Quadro 4.7 – Comparação entre o comportamento face à água das argamassas estudadas e as de Grilo.....	105

Quadro 4.8 – Comparação de alguns parâmetros do ensaio de absorção de água sob baixa pressão das argamassas estudadas neste trabalho com as de Lino	105
Quadro 4.9 – Comparação do coeficiente de absorção de água aos 5 m das argamassas estudadas neste trabalho com as de Fontes na cura SP.....	106

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Enquadramento

Até há muito pouco tempo, o sector da construção tinha como principal actividade a construção nova e a expansão dos centros habitacionais. No entanto, devido ao esgotamento dessa actividade, por ser insustentável do ponto de vista social, económico e ambiental, e devido ao elevado estado de degradação do património português, a tendência em Portugal terá de ser para que haja um aumento significativo de intervenções de reabilitação e conservação.

A intervenção em edifícios antigos, especialmente em edifícios de valor histórico e estético, deve, sempre que possível, ser realizada com o mínimo impacto possível, tentando conservar ao máximo os materiais existentes (VEIGA, 2003). No caso de existir a necessidade de remoção total ou parcial de revestimentos, a escolha da argamassa a substituir deve ser feita tendo em conta um conjunto de requisitos que garantam a compatibilidade entre a argamassa e os elementos pré-existentes. A utilização de argamassas que não cumpram os critérios de compatibilidade pode ter um efeito oposto, contribuindo para a o agravamento das anomalias que se pretendiam corrigir (SANTOS et al., 2012).

Até ao início do século XX as argamassas eram produzidas com cais aérea e hidráulica. Com o aparecimento do cimento Portland, com maiores resistências e menor tempo de cura o uso de cais caiu progressivamente em desuso. Porém, na recuperação de edifícios antigos, as argamassas com base em cimento têm-se revelado incompatíveis com os suportes antigos, mais deformáveis e mais porosos, assistindo-se assim ao reaparecimento, lento, da utilização das cais (MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2005).

A cal hidráulica natural é uma cal com propriedades hidráulicas e aéreas, com características intermédias entre o cimento e a cal aérea. Em relação à cal aérea, tem como vantagem a hidraulicidade, que lhe confere capacidade para endurecer mesmo em ambientes com muito elevado teor de humidade e fraco contacto com o dióxido de carbono, adquirindo maiores resistências em curto prazo (FARRIA et al., 2012). Por outro lado, e relativamente ao cimento Portland, apresenta uma maior compatibilidade com os elementos pré-existentes em edifícios antigos e é produzida a uma temperatura inferior, tornando-a numa opção mais sustentável e económica.

A utilização de pozolanas como componente das argamassas é utilizada há muito tempo tanto em edifícios antigos como em edifícios recentes. Vários estudos que caracterizam argamassas antigas concluem que, no passado, eram utilizados dois tipos de pozolanas: naturais (de origem vulcânica) e artificiais (nomeadamente o pó de tijolo). As pozolanas naturais têm caído em desuso uma vez que muitas vezes não cumprem os requisitos normativos, para além de só existirem em algumas regiões. Assim, e de modo a produzir argamassas semelhantes às argamassas antigas, tem-se vindo a estudar pozolanas artificiais, como o metacaulino (MOROPOULOU et al., 2004).

Esta dissertação, também inserida no projecto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia METACAL (PTDC/ECM/100431/2008: Estudo de argamassas de cal aérea e metacaulino para conservação de edifícios antigos), surge no seguimento do estudo efectuado por Grilo (GRILLO, 2013; Grilo et al., aceite para publicação) em que foram caracterizadas argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com substituição da massa do ligante por metacaulino nas percentagens 0%, 10% e 20%, e em que foi identificada a necessidade de aprofundar o estudo deste tipo de argamassas, particularmente utilizando uma cal hidráulica natural nacional e de formulação recente, cumprindo a nova versão da norma NP EN 459-1:2011.

1.2. Objectivos e metodologia

O presente estudo tem assim como principal objectivo contribuir para um maior conhecimento das argamassas com base em cal hidráulica NHL3.5 de produção nacional de formulação recente, de acordo com a nova norma 459-1 (IPQ, 2011), tendo em conta a cura a que são sujeitas, e ainda estudar a influência da adição do metacaulino por substituição de massa de NHL3.5.

Para tal formularam-se, realizaram-se provetes e caracterizaram-se argamassas com base em cal hidráulica natural NHL3.5, partindo de um traço volumétrico 1:3 de cal e areia e evoluindo para argamassas em que 2,5% e 5% de massa de cal foi substituída por um metacaulino comercial. Para além de ter em conta a influência do teor em metacaulino, foram ainda diferenciadas as condições de cura e a caracterização decorreu ao longo da evolução da idade, aos 28, 90 e 180 dias. Foram ainda realizadas aplicações de rebocos destas argamassas em painéis sobre muretes experimentais que permitiram avaliar as condições de aplicação em condições reais e o comportamento a curto prazo em condições de exposição natural.

1.3. Estrutura e Organização do Texto

A dissertação está dividida em seis capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentado o enquadramento do tema, assim como os principais objectivos do presente trabalho.

No segundo capítulo será abordado o estado actual do conhecimento, baseado numa pesquisa bibliográfica sobre alguns temas relacionados com o presente estudo, nomeadamente sobre argamassas, materiais utilizados, exigências funcionais de rebocos, entre outros. São ainda apresentados alguns resultados obtidos por outros autores para posterior comparação com os resultados obtidos neste estudo.

No terceiro capítulo serão abordadas as diferentes etapas da campanha experimental. São descritos todos os materiais utilizados, todo o planeamento da produção das argamassas, dos provetes e

dos painéis de reboco, todos os ensaios de caracterização realizados e ainda apresentados e analisados os resultados obtidos.

No quarto capítulo são discutidos os resultados obtidos, cruzando os resultados de alguns ensaios realizados e comprando-os com os resultados de outros autores.

No quinto capítulo apresenta-se uma síntese das conclusões retiradas ao longo do trabalho, assim como algumas propostas para estudos futuros que poderão vir a complementar esta dissertação.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Matérias-primas

2.1.1. Ligante – Cal Hidráulica

De acordo com Palomo (PALOMO et al., 2003), uma argamassa define-se como um material resultante da mistura de areias, com um ou mais ligantes e água. As propriedades e características das argamassas dependem, em grande parte, da natureza dos ligantes que a compõem. Este trabalho incide sobre um tipo específico de ligante – a cal hidráulica natural (NHL).

As cals hidráulicas naturais derivam de calcários impuros, com uma quantidade de argila de cerca de 5% a 20%. Quando o calcário é submetido a uma temperatura na ordem de 900-1200°C, o óxido de cálcio formado (CaO) reage com a sílica (SiO_2) e com a alumina (Al_2O_3) da argila, formando-se a cal hidráulica viva. Se a temperatura de cozedura for mais alta (até 1500°C) e o teor de argila mais elevado, a quantidade de silicatos de cálcio ($\text{SiO}_2 \cdot 2\text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaO}$) formada é maior e a quantidade de óxido de cálcio livre menor, aumentando assim a hidraulicidade da cal (FARIA, 2004; SAMPAIO, 1978).

Depois de terminado o processo de cozedura, a cal que é retirada do forno deve ser extinta. A extinção com água é necessária para provocar a pulverização total da cal hidráulica e para eliminar completamente a cal viva, transformando-se o óxido de cálcio em hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) (FARIA, 2004; FONTES, 2013).

O endurecimento da cal hidráulica natural acontece em duas fases distintas. A primeira fase é essencialmente hidráulica, dando-se a hidratação dos silicatos e aluminatos de cálcio logo após a amassadura. A segunda fase é aérea e ocorre a longo prazo, dando-se por reacção do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono atmosférico (SEQUERIA et al., 2007).

A norma NP EN 459-1:2011 (IPQ, 2011), resultante da norma europeia EN 459-1:2010 (CEN, 2010), veio reformular a definição de cal hidráulica, tornando a sua produção mais rigorosa e estabelecendo três classificações que resultam da sua constituição:

- NHL – cal hidráulica natural
- HL – cal hidráulica
- FL – cal formulada

São definidas como cals hidráulicas naturais (NHL) única e exclusivamente, as cals cuja composição não admite qualquer adição e obriga a um teor mínimo de 25% de hidróxido de cálcio e um teor máximo de 2% de sulfatos. Consoante a sua resistência à compressão aos 28 dias, as NHL são subdivididas em NHL2, NHL3,5 e NHL5. Em contrapartida, as cals que não obedecem a estas regras e

incorporem adições ou cimento na sua composição não podem ser agora designadas por cais naturais, mas sim por cais hidráulicas - HL ou por cais formuladas FL, deixando de poderem ser comercializadas, como anteriormente, com a designação de cais naturais hidráulicas (IPQ, 2003).

Esta norma vem alterar o mercado das cais. Sendo Portugal um dos poucos produtores e distribuidores de cais hidráulicas no mundo, torna-se essencial adaptar a sua produção (matéria-prima e processos de fabrico) à comercialização de NHL, com benefícios ao nível da qualidade do produto e da sua utilização (FARIA et al., 2012a).

2.1.2. Agregado – Areias

No âmbito desta dissertação vão utilizar-se areias como agregado de argamassas. Neste caso as areias não são alvo de estudo aprofundado mas, no entanto, considera-se relevante referir o efeito que as mesmas têm nas propriedades das argamassas.

De todos os constituintes de uma argamassa, a areia é a que está presente em maior quantidade, constituindo o esqueleto das argamassas. Deste modo, uma modificação do tipo de areia pode alterar substancialmente as propriedades de uma argamassa (RATO, 2006).

As areias provêm da desagregação das rochas. Do ponto de vista químico, as areias podem ser siliciosas, quando derivadas de areeiro ou de rio, ou calcárias, quando resultam da britagem de fragmentos de rocha calcária. A presença de argila, que geralmente acompanha as areias de areeiro, confere maior trabalhabilidade. Contudo, a presença de argila pode dificultar a ligação do agregado ao ligante e aumentar a retracção das argamassas, diminuindo a sua resistência. (FARIA, 2004; Faria et al., 2007; RATO, 2006; VEIGA et al., 2007).

A forma e a textura das partículas de areia têm um importante efeito na trabalhabilidade das argamassas frescas assim como na resistência e durabilidade das argamassas em estado endurecido (CORTES et al., 2008). Assim, argamassas com agregados mais angulares possuem maiores resistências mecânicas e pior trabalhabilidade, uma vez que apresentam poros de dimensão reduzida e a superfície específica das partículas é alta. Por outro lado, argamassas com agregados arredondados têm menores resistências mecânicas e necessitam de menor adição de água para atingir uma trabalhabilidade que seja aceitável (RATO, 2006; CORTES et al., 2008; MARGALHA, 2008).

Segundo Sandin (SANDIN, 1995) a curva granulométrica dos agregados utilizados nas argamassas deve ser extensa, ou seja, deve ser bem graduada para que os espaços deixados pelas maiores partículas sejam preenchidos pelas partículas de menor dimensão, e assim, aumentar a compacidade das argamassas.

2.1.3. Pozolana – Metacaulino

Segundo a norma NP EN 197-1:2012 (IPQ, 2012), as pozolanas são definidas como materiais siliciosos ou sílico-aluminosos que, por si só, não endurecem na presença de água mas, quando finalmente moídas e hidratadas reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentícias – silicatos e aluminatos de cálcio hidratados.

O metacaulino é uma pozolana artificial ultrafina de origem natural, produzida pela calcinação da argila caulínica a temperaturas entre 570 e 800°C (AMBROISE et al., 1985; SAMET et al., 2007; SIDDIQUE et al., 2009)

No processo de aquecimento, por volta dos 500°C o caulino inicia o processo de desidroxilação, em que se dá a quebra total ou parcial da estrutura cristalina, resultando um material amorfo e fortemente reactivo – o metacaulino (FARIA, 2004; VELOSA, 2006). A uma temperatura muito mais alta, para além dos 900°C, o metacaulino volta a cristalizar, formando-se um material refractário e pouco reactivo – a mulite (RASHAD, 2012; SCHNEIDER et al., 2005).

Segundo Moisés (MOISÉS et al., 2002), a introdução de metacaulino na composição das argamassas permite obter: melhorias na trabalhabilidade, na microestrutura, resistências mecânicas; redução do tempo de cura; redução da permeabilidade e uma maior durabilidade.

Durante as ultimas décadas, assiste-se a um aumento do interesse da indústria do cimento em incorporar materiais pozolânicos no cimento de forma a reduzir as emissões de CO₂. Deste modo, a utilização do metacaulino poderá ser uma opção mais sustentável, visto que a energia consumida no seu fabrico é substancialmente menor que a utilizada no fabrico de cimento (TIRONI et al., 2012). A abundância da matéria-prima do metacaulino (caulino) em Portugal, aliada a sustentabilidade desta pozolana, deve incentivar o seu uso (GAMEIRO et al., 2012).

2.2. Argamassas

2.2.1. Exigências Funcionais

As argamassas têm vários tipos de aplicações, podendo ser utilizadas na reparação, conservação ou reabilitação de edifícios existentes ou na construção nova. Depois de definido o tipo de obra, o tipo de argamassa a aplicar depende ainda da função que esta venha a desempenhar, como por exemplo assentamento de blocos ou tijolos em alvenarias, refechamento de juntas ou revestimentos interiores e exteriores, entre outros (HENRIQUES et al., 2006; HENRIQUES et al., 2008).

No caso dos edifícios antigos com valor histórico ou artístico, as intervenções acima referidas devem ser realizadas com o cuidado de minimizar o impacto no edifício. Idealmente, deve-se limitar a intervenção à conservação do revestimento existente, através de reparações pontuais e operações de manutenção. No caso do anterior processo não ser suficiente para a reparação do revestimento em questão, deve-se, então, consolidar o revestimento existente. A substituição parcial, ou até total, do

revestimento existente, particularmente de revestimentos históricos, só deve ser considerada em casos de revestimentos mais degradados, nos quais é especialmente importante encontrar os materiais de substituição adequados, evitando acelerar o processo de degradação (VEIGA, 2003; PACHECO-TORGAL et al., 2012).

As argamassas utilizadas para o processo de substituição devem apresentar uma boa compatibilidade mecânica, física e química com as alvenarias onde vão ser aplicadas, devendo ainda apresentar as características necessárias para resistir à sua própria degradação. Assim, estas argamassas devem apresentar uma elevada durabilidade, contribuir para a preservação dos elementos pré-existentes, não prejudicar a apresentação visual da arquitectura, nem descaracterizar o edifício e, caso necessário, devem ser de fácil remoção (reversíveis) e reparação (SANTOS et al., 2012; FARIA et al., 2008; VEIGA, 2003).

Por vezes, em intervenções de edifícios antigos, a utilização de argamassas inadequadas, como por exemplo a utilização do cimento Portland, pode conduzir a uma deterioração acelerada e contribuir para o aparecimento de novas anomalias através da introdução de tensões excessivas no suporte; diminuição da permeabilidade ao vapor de água, contribuindo para o humedecimento do suporte e introdução de sais solúveis que previamente eram inexistentes (GROOT, 2012; VEIGA, 2003).

De uma forma resumida, o Quadro 2.1 apresenta as funções e exigências principais de cada tipo de argamassa (HENRIQUES et al., 2006).

Quadro 2.1 – Funções e exigências funcionais de diferentes de cada tipo de argamassa (HENRIQUES et al., 2006)

Tipo de argamassa	Função	Exigências funcionais
Reboco exterior	Protecção contra a acção da água (forma líquida ou vapor)	Baixa absorção de água; elevada permeabilidade ao vapor de água
Reboco interior	Protecção contra acções mecânicas	Boa dureza superficial
Refechamento de juntas	Protecção contra a água e estabilidade estrutural	Baixa absorção de água; elevada permeabilidade ao vapor de água; expansibilidade
Injecções	Estabilidade estrutural	Facilidade de injecção

Os rebocos exteriores têm um importante papel na conservação geral das alvenarias que os suportam já que as protegem dos diversos agentes agressivos – água, choques, produtos químicos presentes no ar (poluição), vento, sais solúveis contidos nos materiais, etc.. Em alguns casos têm também uma função estrutural.

No caso de rebocos exteriores de edifícios antigos, as argamassas devem ter como características principais (HENRIQUES et al., 2006):

- Pouca absorção de água e que essa absorção se dê o mais lentamente possível, ou seja, menor coeficiente de capilaridade e menor valor assintótico;
- Permeabilidade ao vapor de água adequada;
- Estabilidade dimensional;
- A argamassa não deve ser mais rígida que o suporte, ou seja, o módulo de elasticidade da argamassa não deve ser superior ao do suporte;
- As resistências mecânicas das argamassas não devem ser superiores às do suporte;
- No caso de rebocos aplicados em multicamadas, as resistências mecânicas devem decrescer do interior para o exterior;
- Boa aderência entre a argamassa e o suporte;
- Liberação mínima de sais solúveis;
- Resistência elevada ao ataque dos sais;
- Resistência ao ciclo gelo/degelo;
- Endurecimento num tempo suficientemente curto.

De modo a verificar as características das argamassas mencionadas acima e, através de processos iterativos, otimizar as argamassas torna-se importante a realização de vários ensaios, tais como (HENRIQUES et al., 2006):

- Consistência por espalhamento;
- Teor em ar;
- Massa volúmica em estado fresco;
- Módulo de elasticidade;
- Resistências mecânicas;
- Absorção de água por capilaridade;
- Permeabilidade ao vapor de água;
- Resistências ao ataque dos sais;
- Resistência aos ciclos de gelo/degelo;
- Análises químicas e mineralógicas;
- Variações dimensionais (acção da temperatura e humidade).

Veiga (VEIGA et al., 2002) propôs para alguns dos ensaios de caracterização das argamassas a aplicar em edifícios antigos, uma gama de valores que sugere que sejam respeitados pelas argamassas aos 90 dias de idade. Os valores do Quadro 2.2 foram definidos com base na experiência acumulada, sendo por isso meramente indicativos.

Quadro 2.2 – Requisitos dos rebocos a usar em edifícios antigos (VEIGA et al., 2002)

Argamassa	Características mecânicas aos 90 dias			Comportamento face à água
	R_t [MPa]	R_c [MPa]	E_d [MPa]	CC [kg/m ² .min ^{1/2}]
Reboco exterior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	1,0 – 1,5
Reboco interior	0,2 – 0,7	0,4 – 2,5	2000 – 5000	-
Refechamento de juntas	0,4 – 0,8	0,6 – 3,0	3000 – 6000	1,0 – 1,5

R_t – Resistência à tração; R_c – Resistência à compressão; E_d – Módulo de elasticidade dinâmico; CC – Coeficiente de capilaridade

A norma EN 998-1 (CEN, 2010) define também algumas gamas de valores de determinadas propriedades das argamassas para aplicação de rebocos que permitem a classificação dessas argamassas (Quadro 2.3).

Quadro 2.3 – Classificação para as propriedades de argamassas no estado endurecido segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010)

Propriedades	Categoria	Valores
Resistência à compressão aos 28 dias	CS I	0,4 a 2,5 MPa
	CS II	1,5 A 5,0 MPa
	CS III	3,5 a 7,5 MPa
	CS IV	≥ 6 MPa
Absorção de água por capilaridade	W 0	-
	W 1	$CC \leq 0,4$ kg/(m ² .min ^{1/2})
	W 2	$CC \leq 0,2$ kg/(m ² .min ^{1/2})

2.2.2. Algumas Características de Argamassas de Cal Hidráulica

Segundo Penas (PENAS, 2008) e Faria (FARIA, 2004), as características das argamassas com base em cal hidráulica situam-se entre as das argamassas com base em cal aérea e as de cimento Portland.

As tensões que o suporte pode induzir no revestimento ou vice-versa podem ser tais que provoquem a deterioração de um deles (ALVES, 2001). Comparativamente às argamassas de cimento, as argamassas de cal hidráulica apresentam baixas resistências mecânicas, quer à flexão, quer a compressão, sendo que, quando aplicadas em alvenarias antigas, têm menor propensão em danificar o suporte (VEIGA, 2003).

Relativamente à deformabilidade, as argamassas de cal hidráulica possuem uma inferior deformabilidade superior (menor módulo de elasticidade) às das argamassas de cimento. Esta caracterís-

tica pode ser benéfica se este tipo de argamassas apresentar uma boa capacidade de absorção das tensões internas provocadas pela movimentação do suporte (THOMSON et al., 1999).

As argamassas perdem água através da evaporação e através do contacto com suportes absorventes. A elevada capacidade de retenção de água das argamassas de cal hidráulica traduz-se numa perda lenta de água, ou seja, retêm água suficiente para que o processo de cura seja completo e se dê lentamente, diminuindo assim a fendilhação por retracção (PAVIA et al., 2010).

Tal como referido anteriormente, o endurecimento das argamassas de cal hidráulica natural compreende duas fases – uma hidráulica e outra aérea.

2.3. Características de Argamassas de Cal Hidráulica Natural Segundo a Versão em Vigor da Norma

No presente capítulo faz-se uma introdução a outros trabalhos de caracterização de argamassas realizadas no âmbito do mesmo projecto em que se realizou o presente (METACAL) e com os mesmos materiais (NHL3.5, areia e metacaulino) e resumidamente descrevem-se as principais conclusões retiradas pelos autores. Optou-se por expor os resultados que posteriormente irão ser comparados com os da presente dissertação.

Grilo (2013) e Grilo et al. (aceite para publicação) caracterizaram argamassas com cal hidráulica natural NHL3,5 partindo de um traço volumétrico 1:3, com substituição de massa de cal nas percentagens 0%, 10% e 20% aos 28, 90 e 180 dias. Sujeitaram-se as argamassas a quatro diferentes tipos de cura - *standard* (com 65% de HR); marítima (com exposição natural marítima) e cura húmida (com 95% de HR). O estudo permitiu concluir que a introdução de metacaulino contribui para o aumento das resistências mecânicas, em todas as argamassas e em todas as curas. A introdução de 20% de metacaulino revelou-se excessiva para a aplicação em edifícios antigos. Em relação ao comportamento face à água, concluíram que o metacaulino piora ligeiramente as condições secagem das argamassas, mas por outro lado o coeficiente de capilaridade diminui. Os autores concluíram também que a exposição das argamassas a uma cura húmida (HR elevada) é essencial para que ocorra actividade pozolânica. A caracterização físico-mecânica foi acompanhada pela análise microestrutural.

Grilo (2013) e Grilo et al. (2014) analisaram química e mineralogicamente as argamassas anteriores e verificaram que com a idade as resistências mecânicas tendem a diminuir possivelmente devido à estabilidade do hidróxido de cálcio das cais com o metacaulino.

De modo a avaliar conjuntamente o comportamento das argamassas face à absorção e à secagem de água, Grilo (GRILO, 2013) estabeleceu um parâmetro AB (*Aqua Behaviour*) que relaciona as primeiras horas de secagem TS, com os primeiros minutos de absorção de água por capilaridade, CC:

$$AB = \frac{TS}{CC} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

AB [$\text{h}^{0,5}$]: comportamento *aqua*

TS [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]: taxa de secagem

CC [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$]: coeficiente de capilaridade

Sendo constituído pelo quociente entre a TS e o CC, o comportamento face à água é tanto melhor quanto maior o parâmetro AB, pois, por mais elevada que seja a velocidade de absorção de água por capilaridade, o reboco pode secar rapidamente

No Quadro 2.4 são apresentados os resultados das resistências mecânicas; no Quadro 2.5, os valores da absorção de água por capilaridade; e no Quadro 2.6, os valores da secagem.

Quadro 2.4 – Resistências mecânicas de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR (GRILO, 2013; GRILO et al., em revisão)

Argamassa	Ed [MPa]			R _t [MPa]			R _c [MPa]		
	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias
NHL_M	4142	6469	6746	0,5	1,06	1,14	1,19	2,54	2,54
NHL_10Mk_M	5457	5514	4788	0,88	0,84	0,88	3,16	4,73	4,02
NHL_20Mk_M	8904	7271	5875	1,14	1,13	0,88	6,54	5,88	5,1
NHL_S	4094	4447	4694	0,52	0,53	0,58	1,01	1,22	1,14
NHL_10Mk_S	4951	4256	4559	0,84	0,71	0,64	4,07	4,42	3,76
NHL_20Mk_S	7746	8382	6959	1,11	0,85	1,13	6,93	6,52	4,53
NHL_H	5181	6982	7243	0,87	1,19	1,27	1,51	2,36	2,5
NHL_10Mk_H	9185	9425	8285	0,75	1,3	1,38	3,75	4,02	3,62
NHL_20Mk_H	12786	11861	8828	1,39	1,49	1,33	7,1	7,64	5,09

Ed – módulo de elasticidade dinâmico; R_t – resistência à tracção por flexão; R_c – resistência à compressão

Quadro 2.5 – Absorção de água por capilaridade de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR (GRILO, 2013; GRILO et al., em revisão)

Argamassa	28 dias		90 dias		180 dias	
	CC [kg/m ² ·min ^{1/2}]	VA [kg/m ²]	CC [kg/m ² ·min ^{1/2}]	VA [kg/m ²]	CC [kg/m ² ·min ^{1/2}]	VA [kg/m ²]
NHL_M	3,50	21,90	2,80	19,70	3,10	19,40
NHL_10Mk_M	2,40	23,90	2,20	19,60	2,30	20,60
NHL_20Mk_M	1,60	22,70	1,70	19,70	2,00	20,70
NHL_S	3,60	21,40	3,60	20,10	3,60	19,70
NHL_10Mk_S	2,20	21,80	2,30	21,00	2,40	21,10
NHL_20Mk_S	1,70	22,70	1,60	20,80	1,90	21,90
NHL_H	2,90	21,90	2,60	20,20	2,70	19,70
NHL_10Mk_H	2,10	22,50	2,60	20,20	2,30	22,90
NHL_20Mk_H	1,50	23,10	1,20	16,90	2,10	20,80

CC – Coeficiente de capilaridade; VA – Valor assintótico

Quadro 2.6 – Secagem de argamassas de NHL3.5 com 0%, 10% e 20% de metacaulino em curas marítima, a 65% e a 95% de HR (GRILO, 2013; GRILO et al., em revisão)

Argamassa	28 dias		90 dias		180 dias	
	TS [kg/(m ² .h)]	IS [-]	TS [kg/(m ² .h)]	IS [-]	TS [kg/(m ² .h)]	IS [-]
NHL_M	0,13	0,35	0,10	0,32	0,10	0,29
NHL_10Mk_M	0,14	0,40	0,10	0,35	0,09	0,42
NHL_20Mk_M	0,12	0,49	0,09	0,40	0,10	0,40
NHL_S	0,13	0,34	0,09	0,32	0,09	0,32
NHL_10Mk_S	0,14	0,38	0,10	0,37	0,10	0,37
NHL_20Mk_S	0,12	0,47	0,10	0,42	0,10	0,41
NHL_H	0,12	0,35	0,11	0,36	0,11	0,34
NHL_10Mk_H	0,12	0,45	0,09	0,42	0,11	0,41
NHL_20Mk_H	0,10	0,55	0,11	0,40	0,10	0,40

TS – Taxa de secagem; IS – Índice de secagem

Lino (LINO, 2013) também estudou argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 partindo do traço volumétrico 1:3, com substituição da massa de cal nas percentagens 0% e 5%. As argamassas foram aplicadas em muretes experimentais exteriores da estação de envelhecimento natural de revestimentos de paredes do LNEC (EENRevPa) e ensaiadas aos 28, 90 e 180 dias. O autor concluiu que, com a introdução de metacaulino, as características mecânicas diminuíram e verificou uma melhoria no comportamento face à água.

Quadro 2.7 – Valores do ensaio de tubos de Karsten por Lino (LINO, 2013)

Argamassa	Coeficiente de absorção aos 4ml [kg/(m ² .t½)]			Coeficiente de absorção aos 5 min [kg/(m ² .t½)]		
	28 dias	90 dias	180 dias	28 dias	90 dias	180 dias
NHL_ExpNat	1,29	1,16	1,23	0,91	0,76	0,91
NHL_5Mk_ExpNat	1,02	1,61	1,79	0,68	1,27	1,35

Fontes et al. (FONTES et al., 2012) e Fontes (FONTES, 2013) estudaram as propriedades de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 com substituição da massa de cal por metacaulino e resíduo cerâmico. As argamassas foram realizadas ao traço volumétrico 1:3, com percentagens mássicas de substituição de 5% de resíduo cerâmico e 5% de resíduo cerâmico mais 5% de metacaulino. As argamassas foram sujeitas à cura de aspersão de água (SP). Os autores concluíram que a introdução de 5% de resíduo cerâmico e 5% de resíduo cerâmico mais 5% de metacaulino aumenta a absorção de água por capilaridade.

No Quadro 2.8 apresenta-se o coeficiente de absorção de água aos 5 minutos obtido pelos autores.

Quadro 2.8 – Valores do ensaio de tubos de Karsten aos 90 dias por Fontes (FONTES, 2013)

Argamassa	Coeficiente de absorção aos 5 min [kg/(m ² .t½)]
NHL_5Rc_SP	2,77
NHL_5Rc+5Mk_SP	3,2

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A campanha experimental desenvolvida no âmbito desta dissertação teve como objectivo caracterizar argamassas de cal hidráulica natural no traço volumétrico 1:3 (ligante: agregado) com substituição de massa do ligante por metacaulino nas percentagens de 0%, 2,5% e 5%. Para tal, foram formuladas três argamassas distintas com as três diferentes percentagens de incorporação de metacaulino acima referidas.

No presente capítulo são abordadas as diferentes etapas da campanha experimental. Nomeadamente, são descritos os constituintes das argamassas, a produção das argamassas e os respectivos ensaios de caracterização de argamassas em estado fresco, são detalhadas a execução de provetes e as condições de cura a que os provetes foram sujeitos e são ainda descritos os ensaios de caracterização de argamassas em estado endurecido. Por último, e após a descrição de cada procedimento de ensaio, são apresentados e analisados os resultados obtidos.

Toda a campanha experimental decorreu nos laboratórios da Secção de Construção e Hidráulica do DEC, FCT UNL e na Estação de Exposição Natural de Revestimentos, no Campus da Caparica.

3.1. Constituintes das Argamassas

Na presente secção são abordadas as principais características das matérias-primas utilizadas no trabalho experimental para realização das argamassas de traço volumétrico base 1:3 de NHL3.5 e areia. Foram utilizados quatro tipos de constituintes diferentes - as areias, a cal hidráulica natural, o metacaulino e água.

3.1.1. Areia

As areias foram utilizadas como agregado. Utilizou-se uma mistura de três tipos de areias siliciosas lavadas e graduadas: a APAS 12, uma areia de granulometria mais grossa; a APAS 20, de granulometria intermédia; a APAS 30, de granulometria mais fina (Figura 3.2). Em todas as argamassas foi utilizada a mesma quantidade de areia, na proporção volumétrica de 1:1,5:1,5, de APAS 12, APAS 20 e APAS 30, respectivamente. A curva granulométrica (Figura 3.1), a proporção volumétrica anteriormente referida e as baridades (Quadro 3.1) foram determinadas em trabalhos anteriores igualmente realizados no âmbito do projecto METACAL e ainda do projecto LIMECONTECH financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (CARNEIRO, 2012).

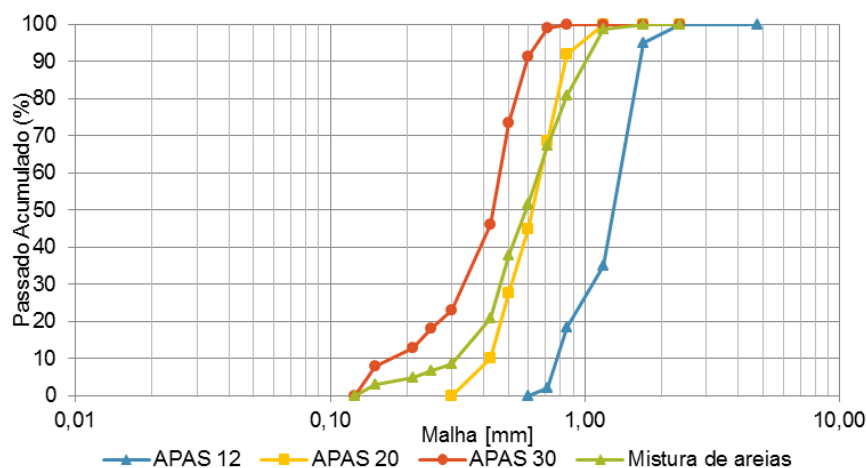


Figura 3.1 – Curva granulométrica das areias e da mistura (MASSENA, 2011)

Todos os processos realizados para a determinação da curva granulométrica das areia e da mistura tiveram por base a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2002a).

Quadro 3.1 – Baridade das areias e da mistura de areias

Material	Baridade [kg/dm^3]
APAS12	1,412
APAS20	1,405
APAS30	1,388
Mistura	1,463

Verifica-se que a mistura das areias procurou a obtenção de uma baridade mais elevada que a de cada areia individualmente. No entanto, esta mistura não foi otimizada e, no manuseamento da mistura verifica-se que poderia ser melhorada pela utilização de um teor de areia fina (APAS30) superior.



Figura 3.2 – Areias: a) APAS 12; b) APAS 20; c) APAS 30

3.1.2. Cal Hidráulica Natural

O ligante utilizado na produção das argamassas foi a cal hidráulica natural produzida e disponibilizada pela SECIL Martingança, classificada pela norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011) como NHL3.5 e identificada neste trabalho por NHL (Figura 3.3). A cal foi disponibilizada pelo produtor em Outubro de 2012, tratando-se do segundo lote fornecido; o primeiro lote tinha sido fornecido em Janeiro de 2012 e utilizado nos trabalhos de Grilo (GRILO, 2013) e Fontes (FONTES, 2013).



Figura 3.3 – Cal hidráulica natural

A caracterização química (lote de Janeiro de 2012) (GRILO et al., aceite para publicação) e a superfície específica da NHL3.5 (PATRÍCIO, 2013) são apresentadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Composição química e superfície específica da NHL 3.5 (GRILO et al., aceite para publicação; PATRÍCIO, 2013)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	LOI*	Superfície específica [m ² /g]
NHL	5.70	1.84	1.22	0.02	1.00	0.08	0.49	0.14	0.03	1.00	62.00	26.00	5.98

A determinação da baridade da cal hidráulica teve por base a norma NP EN 1097-3 (IPQ, 2000) e o procedimento foi o que se descreve em seguida:

Procedimento experimental

Colocou-se um recipiente sob um funil, de modo a que o topo deste ficasse a uma distância de 73 mm do bordo inferior do funil; o volume do recipiente utilizado foi de 749 cm³. Através do funil, encheu-se o recipiente (Figura 3.4a) de modo a que se formasse um cone de material no topo do mesmo (Figura 3.4b). Com uma régua metálica, rasou-se o excesso de material. Pesou-se o conjunto (Figura 3.4c). De modo a alcançarem-se resultados exactos, o procedimento descrito nos pontos anteriores foi repetido três vezes.



Figura 3.4 – a) Preenchimento do recipiente; b) Recipiente preenchido; c) Recipiente rasado

A baridade foi calculada através da Equação 3.1:

$$Ba = \frac{(m_1 - m_0)}{V} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

Ba [g/cm³] - baridade;

m₀ [g] - massa do recipiente;

m₁ [g] - massa do recipiente cheio com o material;

V [cm³] - volume do recipiente.

Resultados obtidos no ensaio

A baridade final da cal hidráulica natural encontra-se no Quadro 3.3 e foi determinada através da média dos resultados das três medições realizadas.

Quadro 3.3– Baridade da NHL e do Mk

Material	Baridade [g/cm ³]
NHL	0,732
Metacaulino Mk	0,294

Comparativamente à baridade apresentada por Grilo (GRILO, 2013), com valor de 0,846 [g/cm³], constata-se a existência de uma diferença.

3.1.3. Metacaulino

No fabrico de duas das três diferentes argamassas estudadas neste trabalho, substituiu-se parcialmente a massa do ligante (cal hidráulica natural) por uma pozolana artificial – o metacaulino (Figura 3.5). Foram utilizadas percentagens de substituição de 0%, 2,5% e 5%. Utilizou-se o metacau-

lino comercial Argicals M 1200 S da IMERYS (doravante designado por Mk), que foi disponibilizado pela empresa ao LNEC para realização dos estudos no âmbito do projecto *METACAL*.



Figura 3.5 – Metacaulino Mk

A caracterização química (GRILO et al., aceite para publicação) e a superfície específica do Mk (PATRÍCIO, 2013) são apresentadas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Composição química e superfície específica do Mk (GRILO et al., aceite para publicação; PATRÍCIO, 2013)

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	LOI*	Superfície específica [m ² /g]
Mk	54.39	39.36	1.75	0.01	0.14	—	1.03	1.55	0.06	-	-	1.90	23.10

A baridade do metacaulino (Quadro 3.3– Baridade da NHL e do Mk) foi determinada em estudos anteriores (CARNEIRO, 2012).

3.2. Suportes

Realizaram-se provetes de argamassa aplicada em suporte de tijolo; utilizaram-se nesses casos tijolos cerâmicos furados com 7 cm de espessura. A caracterização deste suporte foi feita em estudos anteriores (DIAS, 2013; JAMÚ, 2013). No Quadro 3.5 pode ser consultada a condutibilidade térmica do tijolo (λ), a quantidade de água absorvida em 60 minutos de ensaio e o respectivo coeficiente de absorção.

Quadro 3.5 – Caracterização do tijolo furado (DIAS, 2013; JAMÚ, 2013)

Material	λ [W/m.K]		C_{abs}	$Q_{abs.60m}$
	Média	DP	[kg/(m ² .min ^{1/2})]	[ml]
Tijolo Furado	0,596	0,083	0,69	2,57

Também se procedeu à realização de rebocos com as argamassas sobre um murete de alvenaria, também de tijolo furado; embora no caso o tijolo utilizado fosse mais espesso (subcapítulo 3.5) as características serão semelhantes, sem contar com a argamassa de assentamento.

3.3. Argamassas

A campanha experimental iniciou-se com a produção de uma argamassa de cal hidráulica natural (NHL) com um traço volumétrico de 1:3 (NHL: areia) e de outras duas com substituições parciais de cal por metacaulino nas percentagens de massa 2,5% e 5%, de acordo com o referido previamente.

Foram atribuídas designações às argamassas dependendo da percentagem de metacaulino existente na sua composição, designadamente:

- **NHL** - Argamassa de referência de traço volumétrico 1:3 de NHL e areia;
- **NHL_2,5Mk** - Argamassa partindo do traço volumétrico 1:3 mas com 2,5% de massa de metacaulino em substituição da massa correspondente de NHL;
- **NHL_5Mk**: Argamassa partindo do traço volumétrico 1:3 com 5% de massa de metacaulino em substituição da massa correspondente de NHL.

Utilizou-se como agregado uma mistura de três areias – APAS 12, APAS 20 e APAS 30 (ver secção 3.1.1.). Relativamente ao volume de água, foram utilizados 950 ml em cada uma das amassaduras, quantidade igualmente utilizada por Grilo e Carneiro (GRILO, 2013; CARNEIRO, 2012) e que conduziu a argamassas trabalháveis, com o objectivo de comparar os resultados dos seus estudos com os resultados da presente dissertação. Para converter o traço volumétrico em traço ponderal e posteriormente para determinar a massa de cada constituinte foram utilizadas as respectivas baridades (Quadro 3.1 – Baridade das areias e da mistura; Quadro 3.3 – Baridade da NHL e do Mk)

Nos Quadro 3.6 apresentam-se as quantidades dos constituintes das argamassas.

No Quadro 3.7 apresentam-se os traços ponderais e volumétricos das argamassas e a respectiva relação água/ligante, considerando o ligante como o conjunto da massa da NHL e do Mk.

Quadro 3.6 – Massa dos constituintes utilizados em cada argamassa

Argamassa	Massa (g)					Água (ml)
	APAS12	APAS20	APAS30	Mk	NHL	
NHL	1129,6	1686,0	1665,6	0,0	780,4	950,0
NHL_2,5Mk	1129,6	1686,0	1665,6	19,5	760,9	
NHL_5Mk	1129,6	1686,0	1665,6	39,0	741,4	

Quadro 3.7 – Traços ponderais, volumétricos e relação água/ligante

Argamassa	Traço ponderal		Traço Volumétrico		Água/Lig
	Lig:Areia	NHL:Mk:Areia	Lig:Areia	NHL:Mk:Areia	
NHL	1:5,7	1:0,00:5,7	1:3	1:0,00:2,87	1,22
NHL_2,5Mk	1:5,7	1:0,03:5,9	1:2,9	1:0,06:2,95	
NHL_5Mk	1:5,7	1:0,05:6,0	1:2,8	1:0,13:3,02	

3.3.1. Amassaduras

As amassaduras foram realizadas com base na norma europeia EN 1015-2 (CEN, 1998a), seguindo rigorosamente os procedimentos definidos no âmbito do projecto FCT METACAL (FARIA, 2011). Para cada uma das três argamassas realizaram-se cinco amassaduras. O procedimento para a realização das amassaduras descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

De acordo com as quantidades definidas no Quadro 3.6, pesaram-se os constituintes sólidos numa balança de precisão 0,1g (Figura 3.6a). Homogeneizaram-se manualmente os constituintes secos com a ajuda de uma pá, tendo o cuidado de evitar desperdícios e poeiras (Figura 3.6b). Colocou-se a mistura na cuba da misturadora mecânica (Figura 3.7a). Mediu-se a quantidade de água necessária para cada mistura numa proveta graduada. Colocou-se a cuba na misturadora mecânica e, ligando-a na velocidade lenta durante 150 segundos, introduziu-se a água nos primeiros 15-30 segundos de actuação da misturadora (Figura 3.7b). Concluídos os 150 segundos, parou-se a máquina e raspou-se com a pá os bordos e fundo da cuba. Colocou-se novamente a misturadora em funcionamento, dando-se por concluída a amassadura passados 30 segundos.



Figura 3.6 – a) Pesagem dos constituintes; b) Homogeneização dos constituintes



Figura 3.7 – a) Constituintes homogeneizados na cuba; b) Introdução de água na cuba

3.3.2. Caracterização das Argamassas no Estado Fresco

3.3.2.1 Consistência por Espalhamento

Este ensaio tem como finalidade a determinação da consistência e da trabalhabilidade da argamassa no estado fresco. Segundo a norma EN 1015-3 (CEN, 1999a), que serviu de base à realização deste ensaio, a consistência é uma medida de fluidez da argamassa fresca, pois mede a deformação da argamassa quando sujeita a forças exteriores. O procedimento seguido para a realização do presente ensaio descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Limparam-se e humedeceram-se todos os utensílios. Colocou-se o molde cónico centrado na mesa de espalhamento. Inseriu-se a primeira camada de argamassa no molde cónico e compactou-se 15 vezes com um varão metálico (Figura 3.8a). Inseriu-se a segunda camada de argamassa e repetiram-se as 15 pancadas. Com uma régua metálica, rasou-se o molde (Figura 3.8b). Retirou-se o molde. Rodou-se a manivela da mesa de modo a provocar 15 pancadas em 15 segundos. Com o auxílio de uma craveira e de uma régua, mediu-se o diâmetro da argamassa espalhada em duas direcções perpendiculares e determinou-se a sua média (Figura 3.8c).



Figura 3.8 – a) Compactação; b) Molde rasado; c) Medição

Resultados obtidos no ensaio

Na Figura 3.9 e no Quadro 4.1 podem ser consultados os resultados do ensaio de consistência por espalhamento.

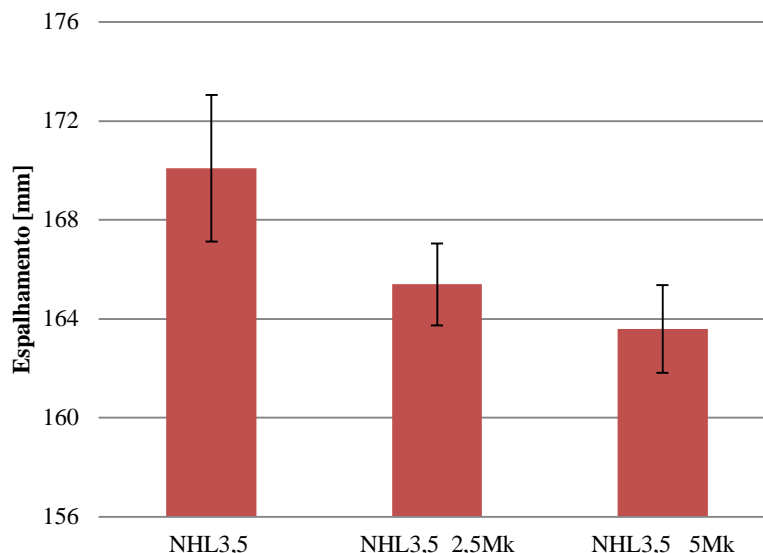


Figura 3.9 – Resultados da consistência por espalhamento

O valor médio e desvio padrão de todas as argamassas foi de 166 ± 5 mm e todas foram consideradas trabalháveis. Analisando a Figura 3.9 verifica-se que a argamassa sem metacaulino, NHL, obteve o maior valor de espalhamento e que a argamassa NHL_5Mk apresentou o menor valor. Tendo em conta que a quantidade de água adicionada a cada argamassa foi a mesma, depreende-se que a substituição de NHL por metacaulino diminui a consistência das argamassas.

3.3.2.2 Retenção de Água

A retenção de água de uma argamassa é a capacidade da mesma de reter a água da amassadura face à evaporação para o ambiente e à absorção pelo suporte.

O ensaio de retenção de água foi realizado em argamassas no estado fresco e teve como base a ficha de ensaio Fe 32 UNL/DEC (HENRIQUES, 2000) e a norma prEN 1015-8 (CEN, 1999). Realizou-se apenas uma determinação por argamassa. Para o processo, descrito em seguida, utilizou-se um molde metálico cilíndrico com 100 mm de diâmetro e 25 mm de altura, uma placa de vidro, gaze de algodão, papéis de filtro circulares e um peso de 2 kg.

Procedimento experimental

Através de uma balança de precisão 0,001g, determinou-se a massa do molde vazio (mv) e de 8 papéis de filtro (mf). Preencheu-se o molde com a argamassa, rasou-se a superfície com uma colher

de pedreiro (Figura 3.10a) e limpou-se o molde. Determinou-se a massa do conjunto do molde e da argamassa (m_c). Cobriu-se a superfície da argamassa com 2 gazes de algodão circular e por cima destas colocaram-se 8 papéis de filtro (Figura 3.10b). Cobriu-se o referido conjunto com uma placa de vidro e inverteu-se o molde sobre uma superfície plana. Durante 5 minutos \pm 5 segundos, colocou-se um peso de 2 kg sobre o molde (Figura 3.10c). Passados 5 minutos retirou-se o peso, colocou-se conjunto na posição inicial, retirou-se a placa de vidro e pesaram-se novamente os papéis de filtro (m_h).



Figura 3.10 – a) Rasagem da superfície; b) Preparação do conjunto para o ensaio; c) Conjunto com peso de 2 kg

Através da Equação 3.2, calculou-se a massa de água utilizada na argamassa colocada no molde:

$$m_a = \frac{ag \times (m_c - m_v)}{\sum c_i + ag} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

m_a [g] - massa de água utilizada na argamassa colocada no molde;

ag [g] - massa de água utilizada na argamassa;

c_i [g] - massa de cada um dos restantes constituintes (i) da argamassa;

m_c [g] - massa do molde com argamassa;

m_v [g] - massa do molde vazio.

Depois de calculado o valor da massa de água do molde, determinou-se a percentagem de água retida (R), através da equação

$$R = \frac{m_a - (m_h - m_f)}{m_a} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

R [%] - retenção de água

m_a [g] - massa de água utilizada na argamassa colocada no molde

m_f [g] - massa inicial dos oito papéis de filtro

m_h [g] - massa dos oito papéis de filtro passados 10 minutos

Resultados obtidos no ensaio

Os valores médios da percentagem de água retida e respectivos desvios padrão podem ser consultados na Figura 3.11 e no Quadro 4.1.

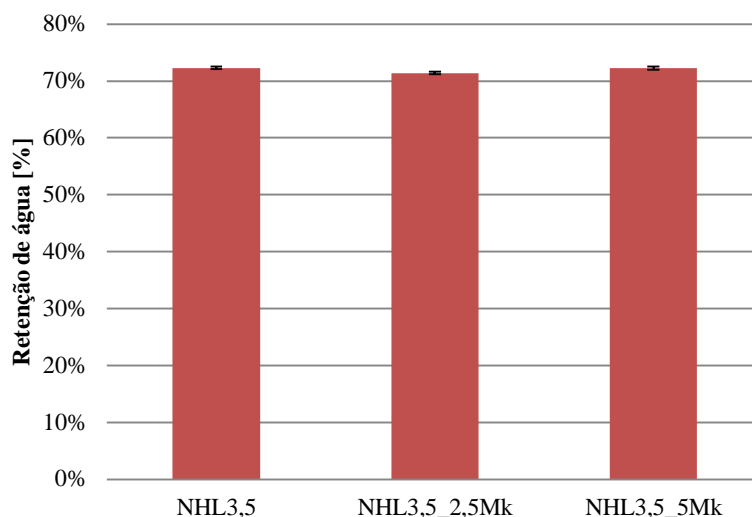


Figura 3.11 – Retenção de água

Através da Figura 3.11, observa-se que a capacidade de retenção de água é semelhante em todas as argamassas.

3.3.2.3 Massa Volúmica Fresca

Este ensaio tem como objectivo calcular a massa volúmica das diferentes argamassas, tendo sido realizado à argamassa em estado fresco. O procedimento seguido teve por base a norma EN 1015-6 (CEN, 1998b) e descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Pesou-se um recipiente cilíndrico vazio, com 1L de volume, numa balança de precisão 0,1g. Preencheu-se o recipiente até metade da sua capacidade com a argamassa a ensaiar. Inclinou-se o recipiente para um lado e deixou-se o cair, repetiu-se este processo nos outros 3 lados – compactando-se a argamassa através da oscilação do recipiente. Encheu-se o recipiente na sua totalidade e repetiu-se o processo de compactação referido no ponto anterior. Rasou-se o topo com uma colher de pedreiro e limpou-se o recipiente com um pano (Figura 3.12). Para finalizar, pesou-se o conjunto.



Figura 3.12 – Molde com argamassa no estado fresco

A massa volúmica da argamassa no estado fresco foi determinada através da Equação 3.4:

$$\rho = \frac{M_{total} - M_r}{V_r} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

ρ [kg/m³] - massa volúmica da argamassa em estado fresco;

M_{total} [kg] - massa do recipiente cilíndrico totalmente preenchido com argamassa;

M_r [kg] - massa do recipiente cilíndrico vazio;

V_r [m³] - volume do recipiente cilíndrico.

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.1 e na Figura 3.13 apresentam-se os resultados do ensaio de determinação da massa volúmica no estado fresco. O ensaio foi realizado uma vez para cada argamassa de forma a poupar material, uma vez que a argamassa foi utilizada no teor em ar.

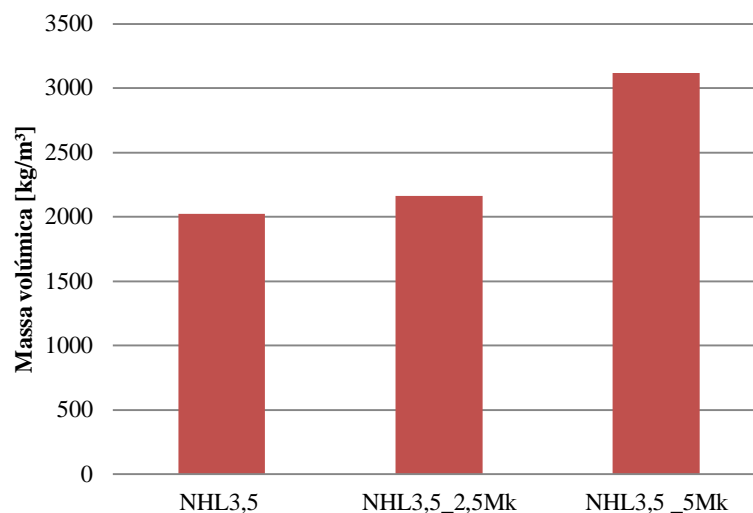


Figura 3.13 – Resultados da massa volúmica no estado fresco

Analisando a Figura 3.13 observa-se um aumento da massa volúmica com o teor em metacaulino, apresentando a argamassa NHL o valor mais baixo e a argamassa NHL_5Mk o valor mais elevado. A substituição da NHL pelo metacaulino indicia assim um aumento da massa volúmica das argamassas no estado fresco.

3.3.2.4 Teor em Ar

Este ensaio tem como objectivo determinar o teor em ar das diferentes argamassas, tendo sido realizado à argamassa no estado fresco. A determinação do teor em ar das argamassas teve por base a norma EN 1015-7 (CEN, 1998c). O procedimento experimental para este ensaio vem no seguimento do ensaio realizado no ponto anterior (ver 3.3.2.3 – procedimento experimental) e descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Colocou-se e compactou-se a primeira camada de argamassa em estado fresco no recipiente cilíndrico, de acordo com o procedimento descrito no capítulo anterior (ver 3.3.2.3 – procedimento experimental). Repetiu-se o processo para a segunda camada. Rasou-se o topo com uma colher de pedreiro e limpou-se o recipiente com um pano. Colocou-se a parte superior do aparelho e fixaram-se os grampos (Figura 3.14). De modo a expulsar o ar do interior, abriram-se as duas válvulas (na figura identificadas pelas letras A e B) e introduziu-se água na válvula A até que a água saísse sem bolhas pela válvula B. Bombeou-se ar para câmara superior para que o ponteiro do manómetro se fixasse um pouco abaixo do zero. Ajustou-se o ponteiro no zero. Fecharam-se as válvulas A e B e pressionou-se a válvula de escape até que o ponteiro estabilizasse. Registou-se o valor do teor de água (%) dado directamente pelo aparelho.



Figura 3.14 – Equipamento para determinação do teor de ar

Resultados obtidos no ensaio

Os resultados do ensaio de teor em ar apresentam-se na Figura 3.15. Os valores obtidos podem ser consultados no Quadro 4.1.

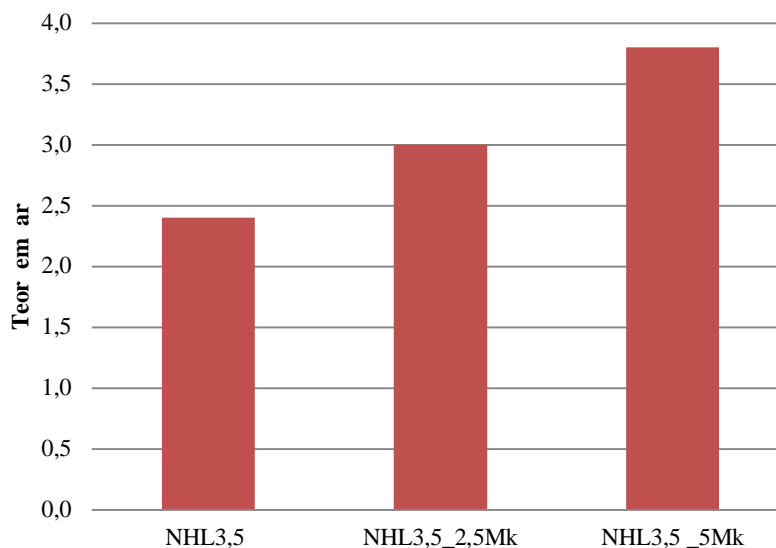


Figura 3.15 – Resultados do teor em ar das argamassas no estado fresco

De acordo com a Figura 3.15 o teor em ar das argamassas no estado fresco tem uma evolução crescente com o aumento do teor em metacaulino.

3.3.3. Execução dos Provetes

Concluída a caracterização das argamassas em estado fresco, procedeu-se à produção dos provetes prismáticos (3.3.3.1) e dos provetes em suporte de tijolo (3.3.3.2).

3.3.3.1 Provetes Prismáticos

Para a execução dos provetes prismáticos foram utilizados moldes metálicos prismáticos, de dimensões 40x40x160 [mm], previamente montados e pincelados com óleo descofrante em todas as faces, com o objectivo de facilitar a posterior desmoldagem dos provetes. Cada molde originou três provetes. As etapas de produção dos provetes foram as que se descrevem em seguida.

Procedimento experimental

Posicionou-se o molde na máquina de compactação (Figura 3.16a) e colocou-se a primeira camada de argamassa fresca dentro do molde até um pouco mais de meia altura (Figura 3.16b). Deu-se início ao funcionamento da máquina e, através de 20 pancadas, compactou-se a primeira camada de

argamassa. Colocou-se e compactou-se a segunda camada de argamassa, repetindo-se os procedimentos descritos nos dois pontos anteriores. Rasou-se o molde com uma talocha de modo a nivelar a superfície dos provetes (Figura 3.16c). Colocaram-se os provetes dentro de sacos de polietileno, durante um total de 7 dias. Ao fim de 2 dias da colocação desmoldaram-se os provetes, mantendo-os dentro dos sacos. Após 5 dias e no final dos 7 dias referidos, os provetes foram retirados dos sacos de polietileno e colocados em cada condição de cura previamente definida (3.3.4 - Condições de Cura).



Figura 3.16 – a) Máquina de compactação; b) Colocação da argamassa no molde; c) Moldes rasados

Foi criada uma nomenclatura com o objectivo de identificar as diferentes argamassas a ensaiar aos 28, 90 ou aos 180 (detalhado no capítulo 3.4. – Ensaio de Caracterização de Argamassas Endurecidas). Adicionalmente, a essa nomenclatura juntaram-se as letras M, H ou S que permitem identificar o tipo de cura a realizar – marítima (M), húmida (H) ou *standard* (S), detalhadas no capítulo 3.3.4 - Condições de Cura. No total, produziram-se 81 provetes prismáticos.

Quadro 3.8 – Organização e designação dos provetes prismáticos

Argamassa	Data a ensaiar								
	28 Dias			90 Dias			180 Dias		
NHL	V11M	V11H	V11S	V14M	V14H	V14S	V17M	V17H	V17S
	V12M	V12H	V12S	V15M	V15H	V15S	V18M	V18H	V18S
	V13M	V13H	V13S	V16M	V16H	V16S	V19M	V19H	V19S
NHL_2,5Mk	V21M	V21H	V21S	V24M	V24H	V24S	V27M	V27H	V27S
	V22M	V22H	V22S	V25M	V25H	V25S	V28M	V28H	V28S
	V23M	V23H	V23S	V26M	V26H	V26S	V29M	V29H	V29S
NHL_5Mk	V31M	V31H	V31S	V34M	V34H	V34S	V37M	V37H	V37S
	V32M	V32H	V32S	V35M	V35H	V35S	V38M	V38H	V38S
	V33M	V33H	V33S	V36M	V36H	V36S	V39M	V39H	V39S

Todos provetes prismáticos do Quadro 3.8 foram utilizados no presente trabalho.

3.3.3.2 Provetes em Suporte de Tijolo

Para a realização de provetes de argamassa sobre suporte de tijolo, as argamassas provenientes das amassaduras foram aplicadas sobre uma das faces maiores de tijolos furados convencionais de dimensões 20x30x7 [cm]. Para tal, utilizou-se um molde rectangular com dimensões em planta aproximadas das do tijolo e com uma altura que permitiu executar uma espessura de provete de 1,5 cm. Para que a força de aplicação fosse constante, independentemente do operador, utilizou-se um afastador com uma altura de 70 cm. O procedimento de aplicação descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Colocou-se o tijolo no molde e humedeceu-se a sua superfície com um borrifador, de modo a evitar a absorção da água da argamassa pelo suporte. Encaixou-se o afastador sobre o molde e, através da abertura do afastador deixou-se cair a argamassa. Retirou-se o afastador, regularizou-se e rasou-se a superfície.

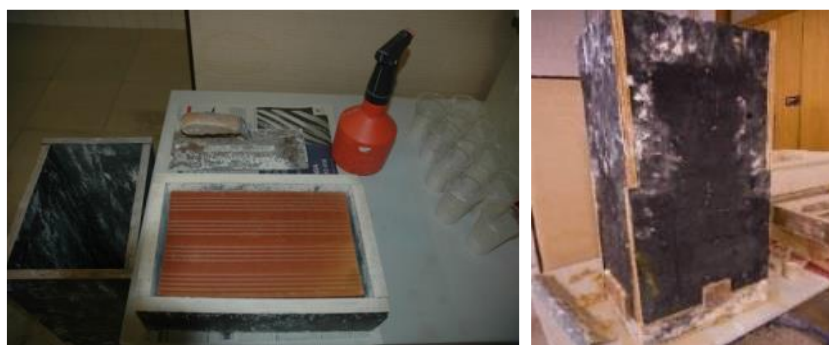


Figura 3.17 – a) Colocação do tijolo no molde; b) Afastador



Figura 3.18 – a) Rasamento da superfície; b) Tijolo preparado

Depois de produzidos, os provetes em suporte de tijolo foram sujeitos à cura M, H, S ou SP – marítima, húmida, *standard* ou *spray* (ver 3.3.4 – Condições de Cura).

À semelhança dos provetes prismáticos, foi criada uma nomenclatura para os provetes de argamassa sobre suporte de tijolo Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Organização e designação dos provetes de argamassa sobre suporte de tijolo

Data a ensaiar	Argamassa	Provetes			
28, 90 e 180 dias	NHL	V1M	V1H	V1S	V1SP
	NHL_2,5Mk	V2M	V2H	V2S	V2SP
	NHL_5Mk	V3M	V3H	V3S	V3SP

3.3.4. Condições de Cura

De forma a estudar a influência das condições de cura nas características das argamassas, foram escolhidos três tipos de cura para os provetes prismáticos (marítima – M; húmida – H; e *standard* – S) e quatro para os provetes em suporte de tijolo (marítima – M; húmida – H; *standard* – S; e *spray* – SP). Neste capítulo descrevem-se os diferentes tipos de cura utilizados.

Cura Marítima (M)

Após moldados, os provetes foram envoltos num saco de polietileno. Foram desmoldados ao fim de 2 dias, permanecendo no saco até atingirem 7 dias. Então os provetes (tanto prismáticos como em suporte de tijolo) foram colocados na Estação de Exposição Natural do LNEC, localizada no Cabo Raso – Cascais, a cerca de 25 metros do Oceano Atlântico. Esta condição de cura sujeita os provetes à aspersão da água salgada e ao contacto com nevoeiro salino, de modo a avaliar a influência de condições de exposição natural em ambiente marítimo, agressivo mas muito frequente em Portugal e noutros países.

Os provetes prismáticos foram colocados na vertical e sobrelevados através de um suporte específico, sendo os seus topos superiores protegidos com peças cerâmicas, para evitar danos graves se ocorre precipitação forte enquanto frescos. Em redor foram colocados prismas de madeira (provetes falsos) para que a exposição fosse semelhante em todos os provetes (Figura 3.19a).

Os provetes em suporte de tijolo foram colocados na vertical sobre um estrado de madeira e fixados com dois varões de aço (Figura 3.19b).

**Figura 3.19** – Cura marítima: a) Provetes prismáticos; b) Provetes em suporte de tijolo

Cura Húmida (H)

A cura húmida foi utilizada com o objectivo de avaliar o comportamento dos provetes em condições de ambiente com elevada humidade relativa. Nos primeiros dias os provetes foram mantidos em condições idênticas às dos provetes da cura anterior. À mesma idade que os anteriores foram colocados no Cabo Raso, estes foram então colocados sobre uma grelha dentro de uma cuba com água, tapada com uma tela de polietileno. A sala onde se encontra a cuba manteve-se em ambiente controlado com humidade relativa (HR) de $95 \pm 5\%$ e com temperatura (T) de $21 \pm 2^\circ\text{C}$. As condições ambientais na cuba da sala de cura húmida encontram-se descritas no Anexo III. Os procedimentos foram semelhantes para os provetes prismáticos e para provetes em suporte de tijolo.



Figura 3.20 – Cura húmida (H)

Cura Standard (S)

Os provetes destinados à cura *standard* (considerada como cura de referência) foram colocados numa sala climatizada do DEC-FCT/UNL, onde foram expostos a uma HR de $65 \pm 5\%$ e a uma temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$, à mesma idade a que os anteriores foram colocados no Cabo Raso e na cuba húmida.



Figura 3.21 – Cura *standard* (S)

Cura Spray (SP)

Esta cura só decorreu nos provetes de argamassa sobre tijolo e não nos prismáticos, por inexistência de moldes disponíveis. Na cura *spray* pretende-se analisar o comportamento dos provetes em condições que, em vez de serem envolvidos no polietileno durante os primeiros dias, se proceda a

aspersão diária de água – situação que pode ser facilmente implementada em obra. Assim, os provetes em suporte de tijolo foram colocados na sala da cura *standard* logo após a moldagem e, durante quatro dias (do 2º ao 5º dia), foram sujeitos a aspersão diária de água (seis aspersões por tijolo).



Figura 3.22 – Cura *Spray*

3.4. Ensaios de Caracterização de Argamassas Endurecidas

Os provetes prismáticos foram divididos em grupos de três provetes, sendo cada grupo ensaiado aos 28, 90 ou aos 180 dias. Cada resultado de ensaio resultou assim da média e desvio-padrão de três provetes. No caso dos provetes em suporte de tijolo, cada provete foi sucessivamente ensaiado aos 28, 90 e 180 dias. Em ambos os casos, estes ensaios tiveram como objectivo a caracterização das argamassas endurecidas.

Antes de se iniciar a campanha experimental das argamassas endurecidas e, de forma a uniformizar o teor de água das argamassas, os provetes que estavam na cura húmida (H) e na cura marítima (M) foram colocados cerca de 24 horas numa sala condicionada, com humidade relativa e temperatura controladas de $65 \pm 5\%$ e $20 \pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente.

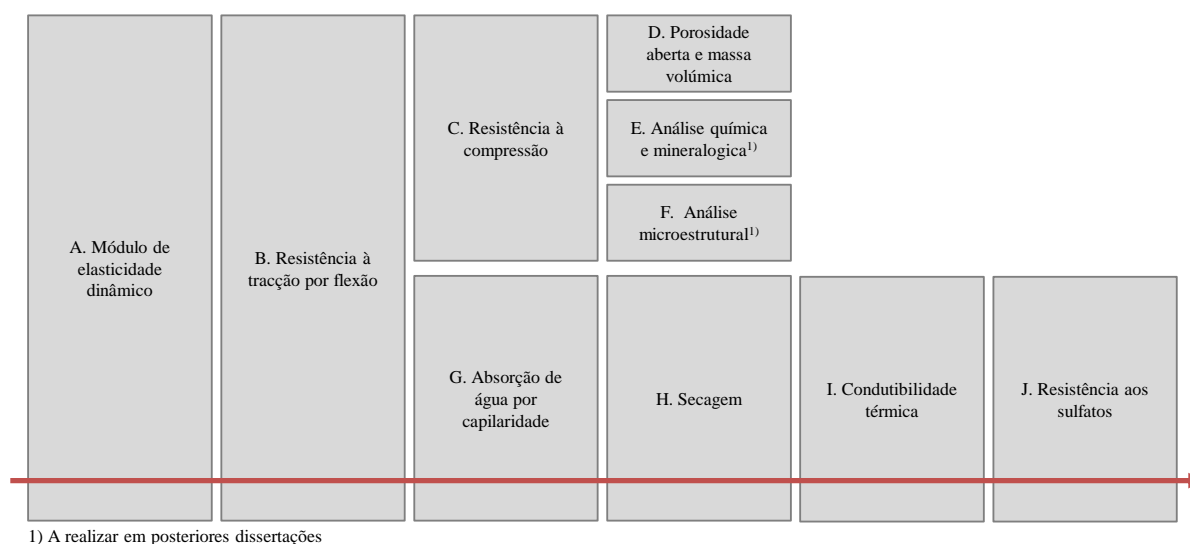
3.4.1. Caracterização dos Provetes Prismáticos de Argamassas

Neste capítulo encontram-se detalhados os 9 ensaios aos provetes prismáticos em estado endurecido. Os diferentes ensaios e as respectivas normas de base utilizadas podem ser consultados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10 – Caracterização de provetes prismáticos no estado endurecido

Ensaio	Norma de base
Massa volúmica aparente em estado seco	Procedimentos METACAL (FARIA, 2011)
Módulo de elasticidade dinâmico	NP EN 14146 (IPQ, 2007)
Resistência à tracção por flexão	EN 1015-11 (CEN, 1999c)
Resistência à compressão	EN 1015-11 (CEN, 1999c)
Absorção de água por capilaridade	EN 1015-18 (CEN, 2002)e EN 15801 (CEN, 2009)
Secagem	Test nº II.5 (RILEM, 1980b)
Condutibilidade térmica	Manual do equipamento
Porosidade aberta e massa volúmica	NP EN 1936 (IPQ, 2008)
Resistência aos sulfatos	NP EN 12370 (IPQ, 2001)

Dado que certos ensaios são destrutivos, a sequência adoptada para a realização dos ensaios foi fundamental. Na Figura 3.23 encontra-se um esquema dos ensaios realizados aos provetes.

**Figura 3.23** – Diagrama dos ensaios de caracterização dos provetes prismáticos

O primeiro ensaio realizado foi o de determinação da massa volúmica aparente dos prismas, em conjunto com a determinação do módulo elasticidade dinâmico (não destrutivo), identificado na figura pela letra A, seguido do ensaio de resistência à tracção por flexão (destrutivo), identificado pela letra B, do qual resultaram sensivelmente duas metades de cada provete (C e G).

Das duas metades, uma foi utilizada no ensaio de resistência à compressão (C) e a outra no ensaio de absorção de água por capilaridade (G).

Da metade C, utilizada no ensaio de resistência à compressão, resultaram três partes: uma parte foi utilizada para os ensaios de porosidade aberta e massa volúmica aparente (D); as restantes foram

secas e ensacadas para paragem da evolução da cura e permitirem uma futura análise química e mineralógica (E) e microestrutural (F)..

A metade G serviu para a realização dos ensaios de absorção de água por capilaridade, secagem (H), condutibilidade térmica (I) e resistência aos sulfatos (J), por esta ordem.

3.4.1.1 Massa volúmica Aparente e Módulo de Elasticidade Dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é um indicador da deformabilidade das argamassas e permite ter uma estimativa das resistências mecânicas do material. No caso de argamassas para aplicação em reboco deve existir compatibilidade entre a argamassa e o suporte, ou seja, o valor do módulo de elasticidade da argamassa nunca deve ser superior do suporte onde a argamassa vai ser aplicada. Como um maior valor do módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma menor deformabilidade da argamassa, tem de ser procurado um compromisso entre resistências mecânicas e deformabilidade.

A determinação do Módulo de Elasticidade Dinâmico foi realizado com base na norma NP EN 14146 (IPQ, 2008) que define métodos de ensaio para pedras naturais através da medição da frequência de ressonância fundamental. Para a realização do ensaio utilizaram-se dados referentes à geometria e massa de cada provete determinados anteriormente, a partir dos quais se determinou a massa volúmica aparente dos provetes.

Para a determinação da massa volúmica aparente utilizou-se uma balança de precisão 0,001 g e uma craveira digital de precisão 0,01mm; para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico utilizou-se de um equipamento adequado para a emissão de vibrações e registo da correspondente frequência de ressonância longitudinal – equipamento “ZEUS Resonance Meter” (Figura 3.9).



Figura 3.24 – Equipamento “Zeus Resonance Meter”

Procedimento experimental

Com recurso a uma craveira, mediram-se as dimensões do provete - comprimento, largura e altura. Pesou-se o provete. Inseriu-se no programa de cálculo do equipamento os valores da massa e das dimensões do provete. Colocou-se o provete sobre o suporte do equipamento de modo a que um

dos topos ficasse em contacto com o emissor de vibrações e a outra ponta com o receptor. Registou-se o valor do módulo de elasticidade dinâmico em MPa, calculado automaticamente pelo programa através da Equação 3.5. Realizaram-se várias leituras do provete, rodando-o em torno do seu eixo longitudinal e alternando também os topos em contacto com emissor e com o receptor.

O equipamento determina automaticamente o Ed, através da Equação 3.5.

$$Ed = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

Ed [MPa] - módulo de elasticidade dinâmico;

l [m] - comprimento do provete;

f_0 [Hz] - frequência de ressonância longitudinal;

ρ [N/m³] - peso volúmico do material;

g [m/s²] - aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 3.11 encontra-se a média e o desvio padrão da massa volúmica aparente de cada provete. No Quadro 4.2 e na Figura 3.25 podem ser consultados os valores médios e respectivos desvios padrão do módulo de elasticidade dinâmico (Ed) das diferentes argamassas quando ensaiadas aos 28, 90 e aos 180 dias. Tal como referido anteriormente (ver 3.4), os provetes provenientes das curas M e H foram colocados durante 24 horas na sala condicionada (cura S) para que houvesse uma uniformização do teor de água das argamassas e os resultados fossem os mais exactos possíveis; mesmo assim, em alguns provetes houve alguma dificuldade realizar as medições.

Quadro 3.11 – Massa volúmica aparente em estado seco

Argamassa	Massa Volúmica Aparente em Estado Seco (kg/m ³)					
	28 dias		90 dias		180	
NHL3,5_M	1819,70	9,1	1868,71	14,1	1865,13	2,4
NHL3,5_2,5Mk_M	1782,62	6,5	1838,51	11,5	1809,85	6,8
NHL3,5_5Mk_M	1819,12	6,6	1813,06	16,6	1791,13	13,4
NHL3,5_S	1806,56	6,4	1838,90	15,5	1843,51	6,7
NHL3,5_2,5Mk_S	1781,25	13,2	1819,19	11,4	1821,28	22,1
NHL3,5_5Mk_S	1782,36	3,7	1802,35	20,2	1842,31	13,2
NHL3,5_H	1843,15	13,4	1842,81	6,2	1860,29	13,7
NHL3,5_2,5Mk_H	1843,92	19,9	1819,62	10,7	1882,97	19,3
NHL3,5_5Mk_H	1840,31	22,3	1826,16	10,7	1846,60	21,9

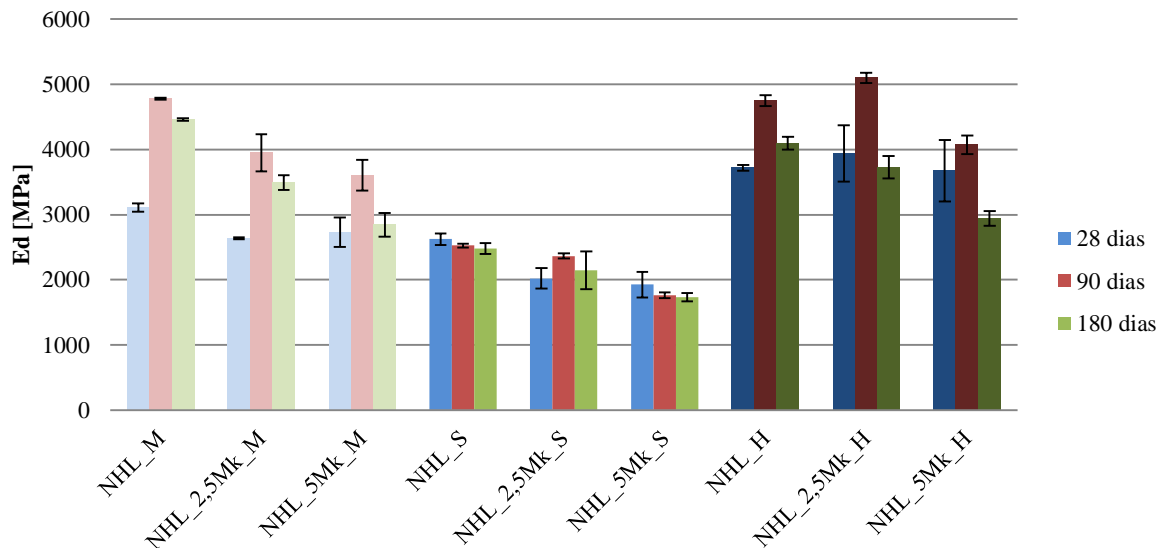


Figura 3.25 – Módulo de elasticidade dinâmico das argamassas nas curas M, S e H ensaiadas aos 28, 90 e aos 180 dias

Analisando a Figura 3.25 observa-se que o valor médio máximo de E_d ocorreu na argamassa NHL_2,5Mk_H aos 90 dias; o valor mínimo foi obtido na argamassa NHL_5Mk_S aos 180 dias, valor muito semelhante aos valores obtidos nos ensaios aos 28 e 90 dias para a mesma argamassa. Registrou-se um intervalo de valores de E_d na ordem de 1700-5100 MPa.

De um modo geral, é possível verificar que dos 28 para os 90 dias em todas as argamassas existe um aumento do valor de E_d (com a exceção das argamassas NHL_S e NHL_5Mk_S em que não existe uma diferença significativa de valores). Dos 90 para os 180 dias o valor de E_d tende a diminuir em todas as argamassas (excepto nas argamassas com cura S em que, tal como dos 28 para os 90 dias, a diferença entre valores é muito reduzida).

De seguida é feita uma análise da influência do aumento do teor em metacaulino na evolução de E_d em cada cura e uma comparação entre argamassas idênticas sujeitas a condições de cura diferentes aos 28, 90 e 180 dias. Os valores de referência utilizados para a análise da influência do aumento de teor em metacaulino são os da argamassa sem metacaulino (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados como valores de referência os valores da cura *standard* (S).

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, observa-se um decréscimo de E_d com o aumento da percentagem de Mk. De seguida é feita uma análise da influência do teor de metacaulino em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias verificou-se na cura M um decréscimo semelhante de E_d das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo o valor de E_d da argamassa NHL_2,5Mk ligeiramente mais elevado que o da argamassa NHL_5Mk; na cura S, registou-se

uma redução semelhante de Ed nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk; na cura H, as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk (argamassas com elevado desvio padrão) aparentam ter um valor médio de Ed semelhante ao da argamassa de referência.

90 dias

Aos 90 dias registou-se na cura M um decréscimo de Ed das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo o valor de Ed da argamassa NHL_2,5Mk um pouco mais elevado que o da argamassa NHL_5Mk; na cura S, registou-se uma diminuição de Ed nas argamassas com metacaulino, sendo esta redução mais acentuada na argamassa NHL_5Mk do que na argamassa NHL_2,5Mk; na cura H, o valor de Ed aumentou na argamassa NHL_2,5Mk e na argamassa NHL_5Mk registou-se uma diminuição em relação a NHL.

180 dias

Aos 180 dias registou-se na cura M um decréscimo de Ed das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo o valor de Ed da argamassa NHL_2,5Mk mais elevado do que o da argamassa NHL_5Mk; na cura S, registou-se uma evolução decrescente com o teor de metacaulino, sendo esta mais acentuada na argamassa NHL_5Mk; na cura H, o valor de Ed da argamassa NHL_2,5Mk apresentou-se semelhante ao da argamassa de referência e verificou-se uma diminuição do mesmo na argamassa NHL_5Mk.

Influência da cura

Genericamente, a cura H registou os maiores valores de Ed e a cura S os menores. De seguida é feita uma análise da influência do tipo de cura a cada idade.

28 dias

Aos 28 dias, na argamassa NHL obteve-se um acréscimo do valor de Ed nas curas M e H em relação à cura de referência S, sendo o valor da cura M inferior ao da cura H; para a argamassa NHL_2,5Mk ambas as curas M e H registaram um valor superior Ed, comparativamente ao valor da cura S; para a argamassa NHL_5Mk ambas as curas M e H obtiveram valores superiores de Ed, apresentando a cura H um valor mais elevado.

90 dias

Aos 90 dias registou-se na argamassa NHL um acréscimo de Ed nas curas M e H em relação à cura de referência S, sendo que o valor da cura M se apresentou semelhante ao da cura H; na argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e H registaram um acréscimo do valor de Ed em relação à cura S, obtendo a cura H o valor mais elevado; para a argamassa NHL_5Mk, a cura M e H registaram um aumento de Ed em relação à cura S, apresentando a cura H um Ed superior ao da cura M.

180 dias

Aos 180 dias e para a argamassa NHL verificou-se um aumento de Ed nas curas M e H em relação à cura de referência S, em que o Ed da cura M se apresentou ligeiramente mais elevado que o da cura H; para a argamassa NHL_2,5Mk registou-se um acréscimo semelhante de Ed nas curas M e H

em relação cura S; para a argamassa NHL_5Mk, ambas as curas M e H registaram um acréscimo semelhante de E_d , em comparação com a cura S.

3.4.1.2 Resistências à Tracção por Flexão

Após o ensaio de determinação do módulo de elasticidade dinâmico (não destrutivo), procedeu-se aos ensaios de determinação de resistências à tracção por flexão e à compressão. Começou-se com o ensaio de resistência à tracção por flexão, feito com base na norma EN 1015-11 (CEN, 1999c).

Para a determinação da resistência à tracção por flexão, utilizou-se uma máquina universal de forças *Zwick*, equipada com uma célula de carga de 2 kN e velocidade de aplicação de carga 0,2 mm/min. A tracção é imposta por flexão em três pontos do provete: por dois apoios acessórios do aparelho, que distam de 100mm entre si, e por um ponto acoplado à célula de carga (Figura 3.26).

Procedimento experimental

Colocou-se o provete sobre os apoios do aparelho, com a face rugosa disposta lateralmente, garantindo-se a perpendicularidade do provete com a célula de carga. Através do *software* do equipamento, deu-se início ao carregamento provocado pela célula de carga de 2kN. Depois de atingida a rotura, registou-se a força máxima de tracção a que o provete foi sujeito, F_f .



Figura 3.26 – Ensaio de resistência à tracção por flexão

O valor da resistência à tracção por flexão, R_t , é obtido através da seguinte equação:

$$R_t = 1,5 \times \frac{F_f \times l}{b^3} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

R_t [MPa] - resistência à tração por flexão;

F_f [kN] - carga de rotura de tracção por flexão;

l [mm] - distância entre pontos de apoio (100mm);

b [mm] - dimensão do lado da secção quadrada do provete (40mm).

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.2 e na Figura 3.27 são apresentados os valores médios e de desvio padrão da resistência à tracção por flexão (R_t) das diferentes argamassas quando ensaiadas aos 28, 90 ou 180 dias.

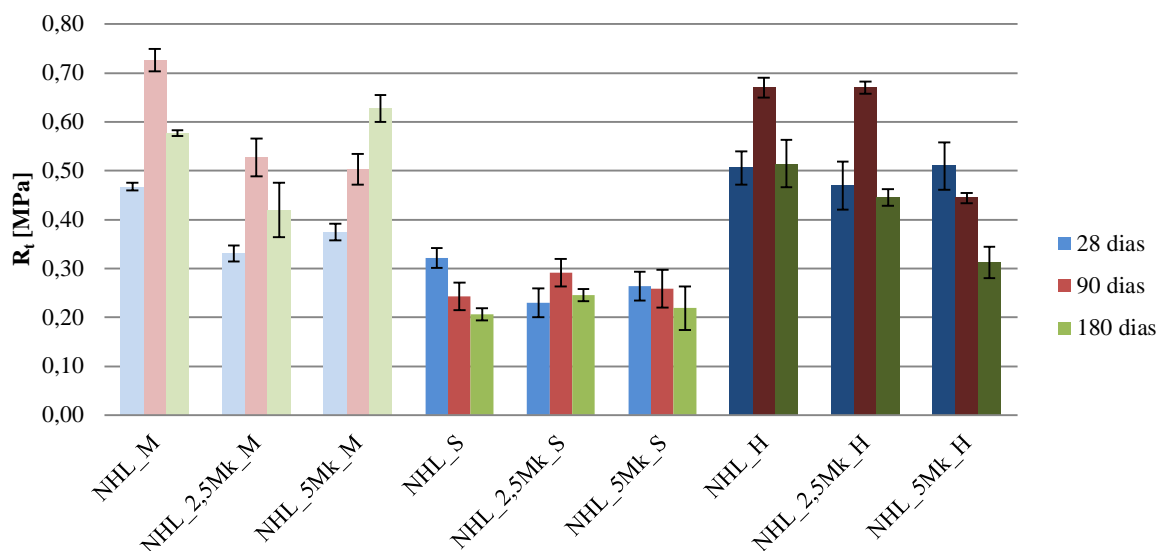


Figura 3.27 – Resistência à tracção por flexão das argamassas em curas M, S e H aos 28,90 e 180 dias

Analisando a Figura 3.27 observa-se que o valor médio mais elevado da resistência à tracção por flexão ocorreu na argamassa NHL_M aos 90 dias; o valor mínimo foi obtido na argamassa NHL_S aos 180 dias. Registou-se uma gama de valores de R_t na ordem de 0,22-0,73 MPa.

Dos 28 para os 90 dias houve um aumento de R_t nas argamassas com curas M e H (excepto na argamassa NHL_5Mk_H), enquanto nas argamassas da cura S registaram-se valores semelhantes na argamassa com 5% de Mk e um decréscimo significativo na argamassa de cal. De um modo geral, dos 90 para os 180 dias deu-se uma diminuição de R_t em todas as argamassas sujeitas às curas (excepto na argamassa NHL_5Mk_M).

De seguida é feita uma análise da evolução dos valores médios de R_t em função do teor de metacaulino em cada cura e a cada idade e uma comparação entre argamassas sujeitas a condições de cura diferentes aos 28, 90 ou 180 dias. À semelhança da análise antes efectuada ao Ed, para a comparação entre argamassas com diferente teor de metacaulino teve-se como referência os valores da argamassa sem metacaulino (NHL); para a comparação entre argamassas expostas a diferentes condições de cura utilizaram-se os valores de referência da cura *standard* (S).

Influência do teor de metacaulino

Fazendo uma análise global da Figura 3.27, e sem particularizar a idade, verifica-se uma diminuição de R_t nas argamassas com metacaulino. De seguida é feita uma análise a cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias registou-se nas curas M e S um decréscimo de R_t das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em comparação com a argamassa de referência NHL, sendo o valor de R_t da argamassa NHL_5Mk ligeiramente superior ao valor da argamassa NHL_2,5Mk; na cura H, as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk apresentam um valor médio de R_t semelhante à argamassa de referência.

90 dias

Aos 90 dias registou-se na cura M um valor semelhante de R_t entre as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk, sendo este valor inferior ao da argamassa de referência NHL; na cura S, os valores de R_t das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk são similares ao da argamassa de referência; na cura H, a argamassa NHL_2,5Mk registou um valor semelhante à argamassa de referência enquanto a argamassa NHL_5Mk teve um decréscimo do valor de R_t .

180 dias

Aos 180 dias, na cura M obteve-se uma diminuição do valor de R_t da argamassa NHL_2,5Mk e um acréscimo na argamassa NHL_5Mk; na cura S ambas as argamassas com metacaulino apresentaram um R_t semelhante ao da argamassa de referência; na cura H, a evolução do valor de R_t foi decrescente com o teor em Mk, sendo o valor na argamassa NHL_2,5Mk superior ao registado na argamassa NHL_5Mk.

Influência da cura

De um modo geral, a cura S apresenta valores de R_t inferiores aos das curas M e H e a cura H valores superiores embora não muito distantes dos da cura M. De seguida é feita uma análise da influência da cura a cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias e para a argamassa NHL registou-se um acréscimo do valor R_t nas curas M e H em relação à cura de referência S, sendo o valor da cura H maior que o da cura M; para a argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e H obtiveram um R_t superior à cura S, apresentando a cura H um valor superior; para a argamassa NHL_5Mk, as curas M e H registaram um aumento do valor de R_t em relação à cura S, sendo o acréscimo da cura H superior.

90 dias

Aos 90 dias obteve-se na argamassa NHL um aumento semelhante de R_t na cura M e na cura H em relação à cura de referência S; para a argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e H registaram um acréscimo de R_t em relação à cura S, sendo o valor da cura H superior ao da cura M; para a argamassa NHL_5Mk, ambas as curas M e H registaram um valor superior de R_t em relação a S, sendo que o valor da cura M superior.

180 dias

Aos 180 dias e para a argamassa NHL verificou-se, em comparação com a cura de referência, um aumento semelhante de R_t na cura M e na cura H; para a argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e H

registaram um acréscimo de R_t semelhante em relação à cura S; para a argamassa NHL_5Mk, as curas M e H registaram um valor de R_t superior à cura S.

3.4.1.3 Resistência à Compressão

Para a determinação da resistência à compressão utilizou-se uma das metades do provete que resultou do ensaio de resistência à tracção por flexão.

A compressão foi aplicada através de uma máquina universal de forças Zwick, equipada com uma célula de carga de 50 kN e velocidade de aplicação de carga 0,7 mm/min (Figura 3.28). Este ensaio foi também realizado de acordo com a norma EN 1015-11 (CEN, 1999c). O procedimento experimental utilizado durante este ensaio descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Colocou-se a metade do provete resultante do ensaio anterior num suporte metálico que faz o contacto total entre a máquina e o provete, assegurando o contacto das faces lisas do provete com a máquina (Figura 3.28). Através do *software* do equipamento, deu-se início ao carregamento provocado pela célula de 50 kN. Depois de se atingir a rotura, registou-se a força máxima de compressão que o provete foi sujeito (F_c).

O valor da resistência à compressão (R_c em MPa) é obtido dividindo a força máxima pela área de aplicação da carga (1600mm^2).

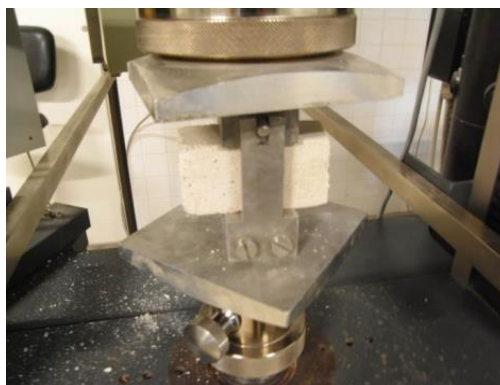


Figura 3.28 – Ensaio de resistência à compressão

Resultados obtidos no ensaio

No quadro Quadro 4.2 e na Figura 3.29 podem ser consultados os valores médios e respectivos desvios padrão da resistência à compressão (R_c) das diferentes argamassas quando ensaiadas aos 28, 90 e 180 dias.

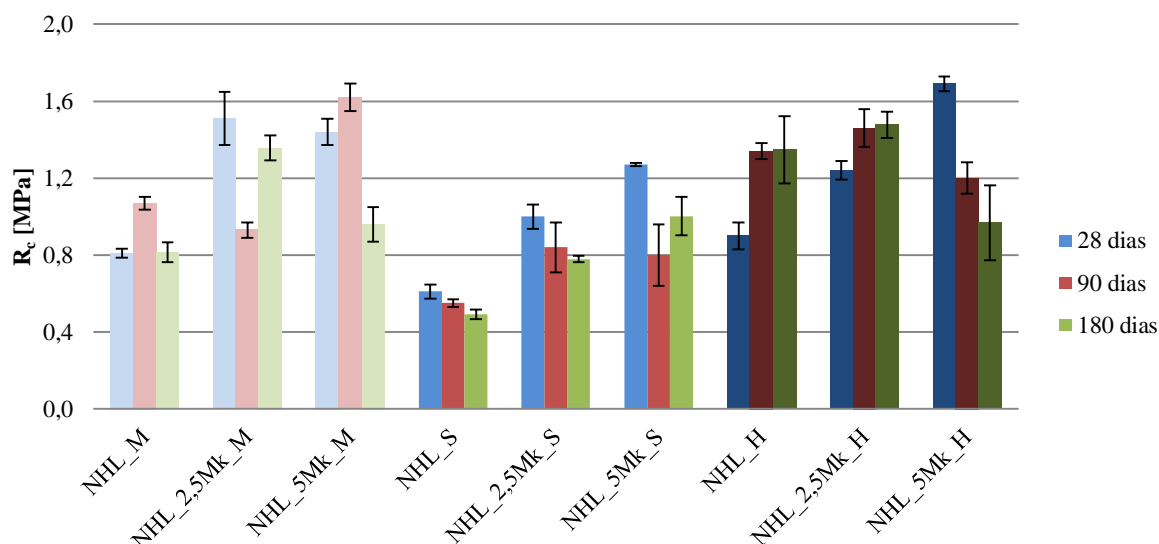


Figura 3.29 - Resistência à compressão das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias

Uma análise da Figura 3.29 permite observar que o valor médio máximo de R_c ocorreu na argamassa NHL_5Mk_H ensaiada aos 28 dias, muito próximo do valor obtido pela argamassa NHL_5Mk_M aos 90 dias. Aos 180 dias a argamassa NHL_S registou o valor mínimo da resistência à compressão. Obteve-se em todas as argamassas valores de R_c na ordem de 0,49-1,70 MPa e algumas apresentaram desvios-padrão significativos.

Dos 28 para os 90 dias registou-se um aumento de R_c nas argamassas NHL_M, NHL_5Mk_M, NHL_H e NHL_2,5Mk_H; genericamente decresceram as argamassas em cura S, a com 2,5% de Mk na cura M e a com 5% de Mk na cura H. De um modo geral, dos 90 para os 180, obteve-se um decréscimo de R_c em todas as argamassas (com a exceção das argamassas NHL_2,5Mk_M, NHL_5Mk_S, NHL_H e NHL_2,5Mk_H – estas duas últimas com valores praticamente estabilizados).

A Figura 3.29 permite uma análise da evolução dos valores médios de R_c em função da percentagem de metacaulino em cada cura e a cada idade e uma comparação entre argamassas com composição idêntica mas sujeitas a diferentes condições de cura aos 28, 90 e 180 dias. À semelhança de análises anteriores (para Ed e Rt), os valores de referência utilizados para a análise da influência do aumento de teor em metacaulino são os da argamassa sem metacaulino (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados como valores de referência os valores da cura *standard* (S).

Influência do teor em metacaulino

Analisando globalmente a influência do teor em Mk na evolução de R_c , observa-se um acréscimo de R_c com o aumento do teor em Mk. De seguida analisa-se, a cada idade, a influência do teor em Mk na resistência à compressão.

28 dias

Aos 28 dias verificou-se na cura M um aumento semelhante do valor médio de R_c nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL; na cura S obteve-se uma evolução crescente de R_c com o teor de Mk, apresentando a argamassa NHL_5Mk um valor superior; na cura H registou-se um acréscimo de R_c das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência, sendo superior o valor da argamassa NHL_5Mk.

90 dias

Aos 90 dias registou-se na cura M um aumento de R_c na argamassa NHL_5Mk e uma ligeira diminuição na argamassa NHL_2,5Mk em relação à argamassa de referência; na cura S, as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk registaram um acréscimo semelhante de R_c ; na cura H, a argamassa NHL_2,5Mk apresenta um ligeiro aumento de R_c em relação à argamassa de referência, enquanto a argamassa NHL_2,5Mk regista uma diminuição.

180 dias

Aos 180 dias observa-se na cura M um acréscimo de R_c nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo o acréscimo superior na argamassa NHL_2,5Mk; na cura S regista-se um aumento de R_c nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk, apresentando a argamassa NHL_5Mk um valor superior; na cura H verifica-se um aumento de R_c na argamassa NHL_2,5Mk e uma diminuição na argamassa NHL_5Mk.

Influência da cura

De um modo geral, as argamassas com cura H apresentam valores superiores de R_c , embora não muito afastados dos valores da cura M. De seguida faz-se uma análise da influência da cura na evolução de R_c a cada idade.

28 dias

Aos 28 dias registou-se para a argamassa NHL e NHL_5Mk um acréscimo de R_c nas curas M e H em relação à cura de referência S, apresentando a cura H um valor ligeiramente mais elevado que o da cura M; para a argamassa NHL_2,5Mk registou-se um acréscimo de R_c nas curas M e H, sendo o valor da cura M mais elevado que o da cura H.

90 dias

Aos 90 dias observou-se para a argamassa NHL um aumento de R_c na cura M e H em relação à cura de referência S, sendo o valor da cura H superior ao da cura M; para a argamassa NHL_2,5Mk registou-se um acréscimo do valor de R_c nas curas M e H, apresentando a cura H um valor mais elevado; para a argamassa NHL_5Mk, ambas as curas M e H apresentaram valores superiores de R_c , sendo o valor da cura M superior ao da cura H.

180 dias

Aos 180 dias obteve-se na argamassa NHL um aumento de R_c nas curas M e H em relação à cura de referência S, apresentando a cura H um valor médio superior ao da cura M; para a argamassa

NHL_2,5Mk registou-se um acréscimo de R_c nas curas M e H, sendo que a cura H obteve um valor ligeiramente superior; para a argamassa NHL_5Mk ambas as curas M e H registaram um valor de R_c semelhante à cura S.

3.4.1.4 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade permite a construção da curva de absorção de água por ascensão capilar de uma argamassa, que por sua vez permite a determinação de dois parâmetros – o coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA). O CC traduz a velocidade de absorção inicial de água, enquanto o VA traduz a quantidade máxima de água absorvida. Estes parâmetros permitem avaliar o comportamento das argamassas face à acção da água da chuva e também, de algum modo, a sua sensibilidade aos ciclos gelo-degelo. De um modo geral, são favoráveis argamassas com valores de CC e VA mais baixos, ou seja, com menor velocidade de absorção de água e menor quantidade total de água absorvida.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado na sala condicionada com humidade relativa e temperatura controladas de $65 \pm 5\%$ e $20 \pm 2^\circ\text{C}$, respectivamente. O ensaio foi realizado com base nas normas EN 15801 (CEN, 2009) e EN 1015-18 (CEN, 2002).

Para o presente ensaio, utilizou-se uma caixa estanque, uma estufa a 60°C , um tabuleiro com rede plástica, um nível, uma régua, uma balança de precisão 0,001g, película de polietileno e uma caixa de Petri. O procedimento experimental descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Colocaram-se os provetes na estufa de 60°C durante 48h para que atingissem massa constante (Δ massa $<0,1\%$ num intervalo de 24h). Prepararam-se as caixas estanques para realização do ensaio – nivelou-se o tabuleiro com a rede plástica dentro das caixas, introduziu-se água no tabuleiro de forma a criar uma lâmina de água com 5 mm acima da rede e encheu-se o fundo da caixa com água de modo a criar um ambiente saturado. Retiraram-se os provetes a ensaiar da estufa e deixaram-se arrefecer até atingirem a temperatura ambiente. Envolveram-se as faces laterais de cada provete com película aderente de polietileno de forma a garantir que a ascensão e a evaporação da água se dessem na vertical (Figura 3.30a). Pesaram-se os provetes numa balança de precisão 0,001g. Introduziram-se ordenadamente os provetes no tabuleiro dentro da caixa estanque com um desfasamento de 20 segundos e com a base lisa em contacto com a lâmina de água (Figura 3.30b). Efectuaram-se pesagens aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos e depois de hora a hora até a curva de absorção atingir o início do patamar de estabilização (Figura 3.30c). Pesaram-se os provetes diariamente. Deu-se por terminado o ensaio quando se registou uma diferença de massa inferior a 1% no intervalo de 24h.



Figura 3.30 – a) Aplicação da película aderente; b) Disposição dos provetes na caixa; c) Pesagem

O desfasamento de 20 segundos, referido anteriormente no procedimento experimental, deve-se ao facto de no processo de pesagem ser necessário retirar individualmente os provetes do tabuleiro, sacudi-los de forma a retirar o excesso de água, colocá-los na balança de precisão 0,001g, registar o valor e colocar novamente os provetes na caixa – garantindo-se, com este desfasamento, que todos os provetes se encontram o mesmo período de tempo em contacto com a água. Em todo o ensaio houve o cuidado de garantir que a lâmina de água se mantinha 5 mm acima da rede plástica e que entre pesagens as caixas se encontravam correctamente fechadas.

Os valores das massas foram inseridos num gráfico para que fosse possível verificar, entre pesagens, quando fosse atingido o patamar de estabilização da curva de absorção.

A curva de absorção de água por capilaridade foi construída através do traçado de um gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida por metro quadrado, M [kg/m²] (em ordenadas), com a raiz quadrada do tempo t [min^{0,5}] (em abcissas). A quantidade de água absorvida entre o instante t_0 e o instante t_i por área da base é expressa por:

$$M = \frac{m_i - m_0}{S} \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

M [kg/m²] - massa da quantidade de água absorvida por área da base;

m_i [kg] - massa do provete no instante t_i ;

m_0 [kg] - massa do provete no instante t_0 ;

S [m²] - área da base do provete em contacto com a água [0,04x0,04].

Concluído o ensaio, determinou-se o valor assintótico (VA) e o coeficiente de capilaridade (CC). O valor assintótico, VA [kg/m²], é traduzido pelo total de água absorvida por capilaridade e o coeficiente de capilaridade, CC [kg/m²], é obtido pelo declive inicial da curva de absorção de água (Figura 3.31).

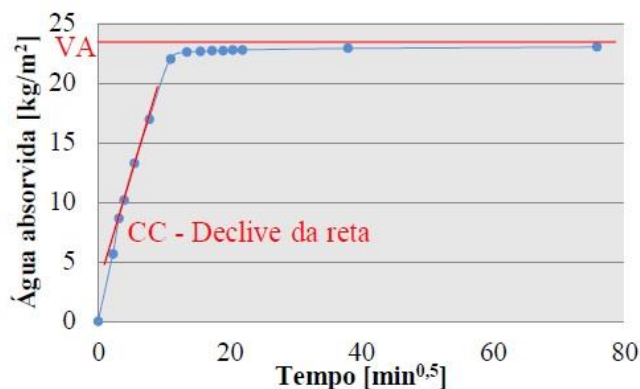


Figura 3.31 – Valor assintótico VA e coeficiente de capilaridade CC a partir da curva de absorção de água (GRILO, 2013)

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.2 podem ser consultados os resultados obtidos neste ensaio. Na Figura 3.32 e na Figura 3.33 podem ser consultados os valores médios e respectivos desvios padrão do coeficiente de capilaridade (CC) e do valor assintótico (VA), respectivamente. A Figura 3.34 apresenta evolução do ensaio de absorção de água por capilaridade das argamassas sujeitas às três curas às idades dos 28, 90 e 180 dias e uma maior pormenorização da fase inicial do ensaio.

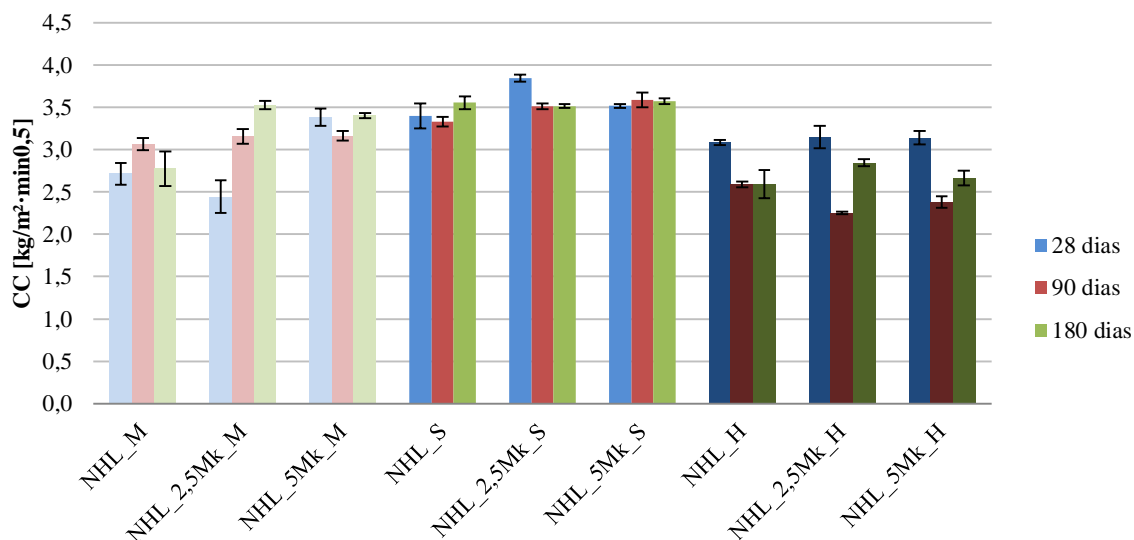


Figura 3.32 – Coeficiente de capilaridade das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

Analisando a Figura 3.32 e a Figura 3.34 verifica-se que o valor médio máximo de CC ocorreu na argamassa NHL_2,5Mk_S aos 28 dias; o valor mínimo de CC foi obtido na argamassa NHL_2,5Mk_H aos 90 dias. Registou-se uma gama de valores de CC na ordem de 2,25-3,85 $[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}]$.

De um modo geral, verifica-se dos 28 para os 90 dias um decréscimo do valor médio CC (com a exceção das argamassas NHL_M, NHL_2,5Mk_M e NHL_5Mk_S). Dos 90 para os 180 dias, de um modo geral, regista-se um acréscimo em todas as argamassas com cura M e H (excepto NHL_M e NHL_H) e nas argamassas com cura S observou-se uma estabilização dos valores (excepto na argamassa NHL_S onde se registou um ligeiro acréscimo).

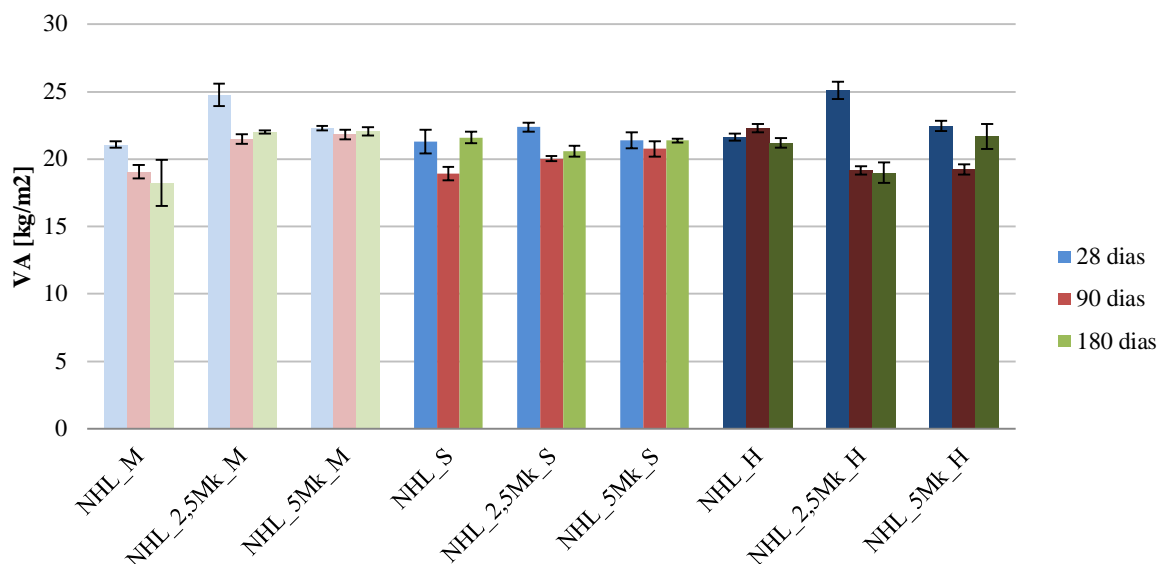


Figura 3.33 – Valor assintótico das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

Relativamente ao VA, através da observação das curvas de absorção (Figura 3.34) e simultaneamente através da análise do gráfico de barras (Figura 3.33) observa-se que os valores de VA foram consistentes, variando entre cerca de 18 e 25 [kg/m²]. O valor máximo de VA foi obtido na argamassa NHL_2,5Mk_H aos 28 dias; o valor mínimo foi alcançado na argamassa NHL_M aos 180 dias (de referir o elevado desvio padrão).

Genericamente dos 28 para os 90 dias, todas as argamassas obtiveram uma diminuição do seu valor (salvo NHL_H que apresentou um ligeiro acréscimo), sendo esta muito reduzida nas argamassas com 5% de Mk das curas M e S. Dos 90 para 180 as argamassas NHL_S e NHL_5Mk_H registaram um aumento significativo de VA, enquanto as restantes um ligeiro acréscimo.

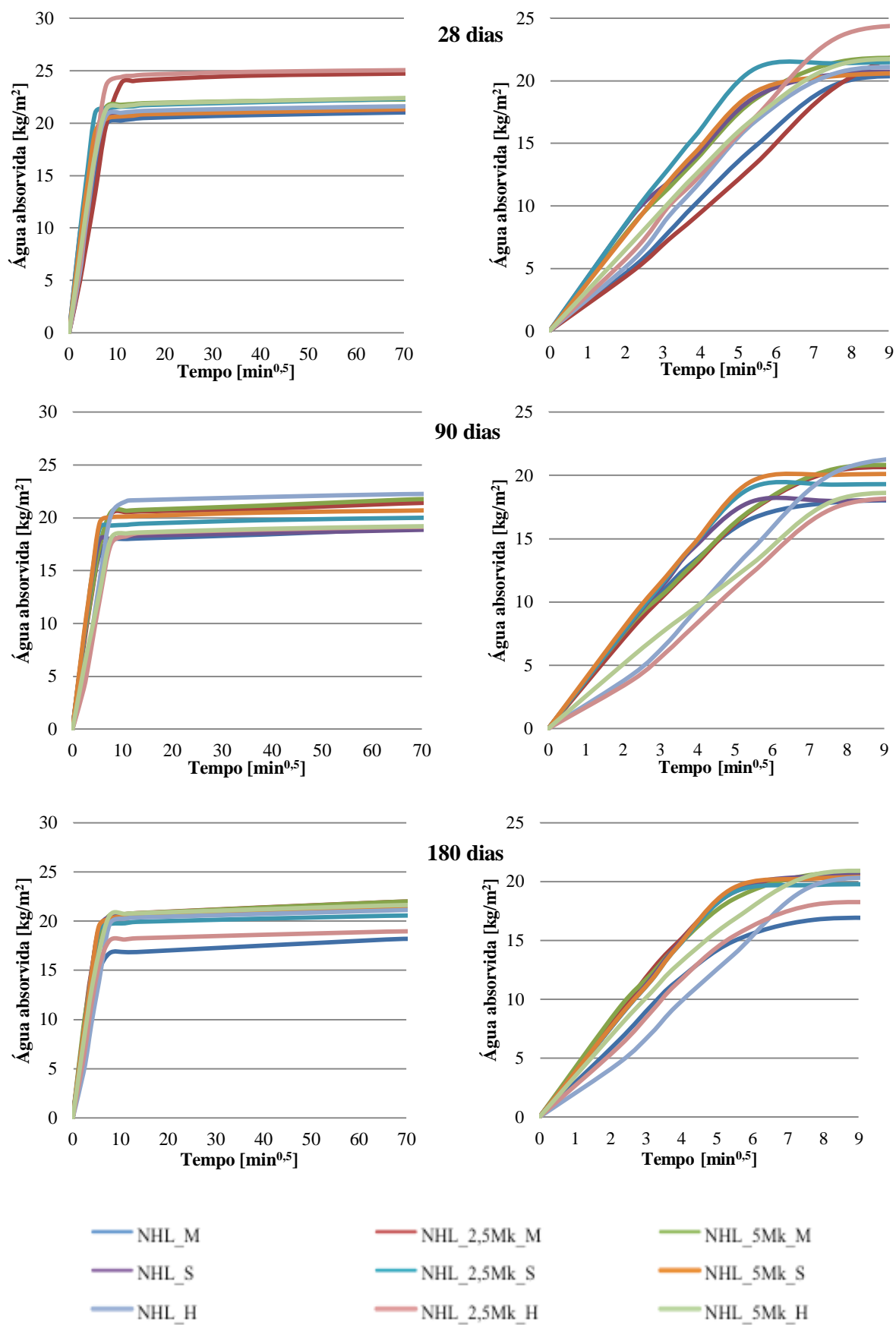


Figura 3.34 – Curvas de absorção de água por capilaridade das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

As figuras anteriores (Figura 3.34; Figura 3.32; Figura 3.33) permitem uma análise da influência do aumento de teor em metacaulino na evolução das curvas de absorção de água das argamassas e uma comparação entre argamassas idênticas mas sujeitas a condições de cura diferentes aos 28, 90 e 180 dias. A análise da evolução das curvas de absorção de água é feita através dos parâmetros CC (declive inicial da curva de absorção) e VA (quantidade máxima de água absorvida). Os valores de referência utilizados para a análise da influência do teor em Mk são os da argamassa sem metacaulino (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados como valores de referência os valores da cura *standard* (S).

De seguida são feitas as análises referidas no parágrafo anterior, começando com o CC e terminando com o VA. É importante referir que o cálculo de VA foi realizado com base em meios provetes com volume que apenas em termos médios se pode considerar semelhante.

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, sem particularizar a idade, as argamassas com Mk apresentam ligeiros aumentos da velocidade de absorção de água por capilaridade (CC), salvo alguns dados referidos de seguida.

28 dias

Aos 28 dias registou-se, na cura M, um ligeiro decréscimo de CC na argamassa NHL_2,5Mk e um acréscimo na argamassa NHL_5Mk em relação à argamassa de referência; na cura S ambas as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk registaram um ligeiro aumento de CC em relação à argamassa de referência NHL, sendo o valor NHL_2,5Mk ligeiramente mais elevado do que o da NHL_5Mk; na cura H não se registaram variações significativas de CC das argamassas com Mk em relação à argamassa de referência.

90 dias

Aos 90 dias, e para as argamassas com cura M, verificou-se um ligeiro acréscimo de CC nas argamassas com Mk em comparação com a argamassa NHL; na cura S registou-se um ligeiro aumento de CC com o aumento da percentagem de Mk, sendo este mais elevado na argamassa NHL_5Mk; na cura H observou-se uma ligeira diminuição de CC nas argamassas com Mk em relação à argamassa sem Mk, NHL.

180 dias

Aos 180 dias verificou-se na cura M um aumento semelhante de CC das argamassas com Mk em relação a NHL; na cura S não se registaram variações significativas de CC com o teor em Mk; na cura H registou-se uma evolução crescente de CC com o aumento da percentagem de Mk, sendo o acréscimo superior na argamassa NHL_5Mk.

Influência da cura

De um modo geral, as argamassas com cura S apresentam maiores valores de CC e as com cura H menores valores. De seguida é feita uma análise da evolução de CC com o tipo de cura a cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias, para as argamassas NHL e NHL_2,5Mk, registou-se nas curas M e H uma diminuição de CC em relação à cura de referência S, sendo o valor da cura M inferior ao da cura H; na argamassa NHL_5Mk observou-se que a cura M regista um valor de CC semelhante à cura S e a cura H uma ligeiramente inferior.

90 dias

Aos 90 dias registou-se em todas as argamassas um decréscimo de CC nas curas M e H em relação a S, sendo o decréscimo mais acentuado na cura H.

180 dias

Aos 180 dias verificou-se nas argamassas NHL e NHL_5Mk um decréscimo de CC nas curas M e H relação à cura S, sendo este mais acentuado na cura H; na argamassa NHL_2,5Mk, observou-se uma diminuição de CC na cura H e na cura M um valor semelhante.

De seguida é feita uma análise do valor assintótico (VA). É importante notar o desvio padrão da argamassa NHL_M aos 180 dias por ser mais elevado que os restantes.

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, não se registaram variações da quantidade total de água absorvida por capilaridade (VA) com a substituição parcial (de 2,5% e 5%) da massa de NHL por Mk.

28 dias

Aos 28 dias registou-se nas curas M e H um acréscimo de VA das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo, de salientar um maior acréscimo na argamassa NHL_2,5Mk; na cura S não se verificaram variações significativas de VA entre as diferentes argamassas.

90 dias

Aos 90 dias verificou-se nas curas M e S um ligeiro acréscimo de VA das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação a NHL, sendo este acréscimo semelhante entre ambas as argamassas com Mk; na cura H, as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk registaram uma diminuição de VA em relação a NHL, sendo o decréscimo semelhante em ambas.

180 dias

Aos 180 dias, observou-se na cura M um aumento de VA das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação a NHL, sendo o acréscimo semelhante entre as duas argamassas com Mk; na cura S, a argamassa NHL_2,5Mk sofreu um ligeiro decréscimo de VA e a argamassa NHL_5Mk não

registou uma variação significativa em relação a NHL; na cura H, verificou-se uma diminuição de VA da argamassa NHL_2,5Mk e a argamassa NHL_5Mk apresentou valores semelhantes à argamassa NHL.

Influência da cura

De um modo geral, não se verificaram alterações significativas de VA nas diferentes curas. Em seguida, faz-se uma análise detalhada dos resultados.

28 dias

Aos 28 dias registaram-se nas argamassas NHL e NHL_5Mk valores homogêneos de VA em todas as curas; na argamassa NHL_2,5Mk observou-se um acréscimo semelhante de VA nas curas M e H em relação à cura de referência S.

90 dias

Aos 90 dias e em comparação com o VA da cura S, registaram-se valores semelhantes na argamassa NHL na cura M e valores maiores na cura H; nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk observou-se um aumento de VA na cura M e um decréscimo na cura H, em relação à cura S.

180 dias

Aos 180 dias observou-se na argamassa NHL um decréscimo de VA na cura M (argamassa com elevado desvio padrão), enquanto na cura H os valores permaneceram estáveis em relação à cura de referência S; na argamassa NHL_2,5Mk, a cura M obteve um acréscimo de VA e a cura H registou um decréscimo; na argamassa NHL_5Mk, as curas M e H não registaram alterações significativas de VA em relação a S.

3.4.1.5 Secagem

O ensaio de secagem, tal como o ensaio anterior, foi realizado na sala condicionada a $65 \pm 5\%$ e HR e $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Foram utilizados os provetes saturados de água provenientes do ensaio de absorção de água, correspondendo a última pesagem do ensaio de capilaridade à primeira pesagem do ensaio de secagem.

As condições da sala em que foi realizado o ensaio aos 28 dias foram diferentes dos 90 para os 180 dias.

O procedimento do ensaio foi baseado na especificação da RILEM (RILEM, 1980b) e é descrito em seguida.

Procedimento experimental

Retiraram-se os provetes da caixa estanque utilizada para o ensaio de capilaridade, mantendo-se película aderente utilizada no ensaio anterior. Pesaram-se os provetes numa balança de precisão 0,01g. Para que a evaporação se desse apenas pelo topo superior, colocaram-se os provetes numa bancada metálica lisa (Figura 3.35). No primeiro dia de ensaio efectuaram-se pesagens de hora a hora até

perfazerem quatro horas. Pesaram-se os provetes diariamente até que a variação da massa fosse menor que 1% - o ensaio terminou ao fim de 500 horas.



Figura 3.35 – Ensaio secagem

No decorrer do ensaio, de modo a acompanhar o andamento do teor de água, foi construída a curva de secagem. A curva de secagem relaciona o teor de água (em ordenadas), com o tempo de ensaio (em abcissas).

O teor em água, W_t [%], é determinado através da seguinte equação:

$$W_t = \frac{m_i - m_0}{m_i} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

W_i [%] - teor em água;

m_i [g] - massa do provete no instante t_i ;

m_0 [g] - massa do provete seco.

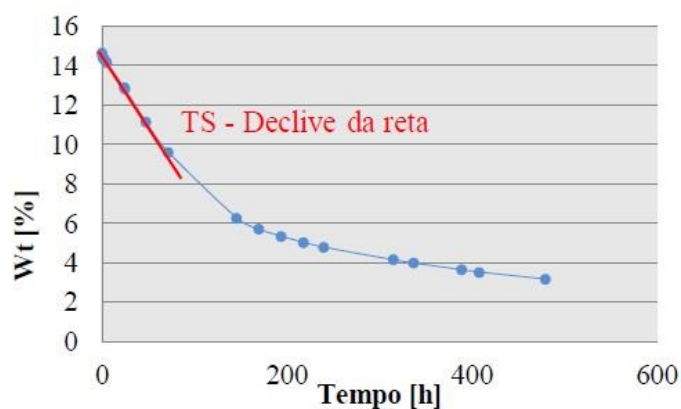


Figura 3.36 – Taxa de secagem e curva de secagem (GRILO, 2013)

Através dos dados recolhidos, determinaram-se dois parâmetros – a taxa de secagem (TS) e o índice de secagem (IS). A taxa de secagem, TS [kg/(m².h)], foi obtida através do declive da recta do

troço inicial da curva de secagem (Figura 3.36), com valores em kg/m^2 em vez de em percentagem. Para o cálculo do índice de secagem, IS [-], foi utilizado o método simplificado de integração numérica – a regra do trapézio (Equação 3.9) (FARIA et al., 2012a; BRITO, 2011).

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^n [(t_i - t_{i-1}) \times (\frac{w_{t_{i-1}} + w_{t_i}}{2})]}{W_{\text{máx}} \times t_f} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

IS [-] - índice de secagem;

t_i [h] - tempo do ensaio t_i ;

t_f [h] - tempo final do ensaio;

w_{t_i} [%] - teor em água do provete no instante t_i ;

$W_{\text{máx}}$ [%] - quantidade de água inicial, em relação à massa seca.

De um modo geral, são mais favoráveis argamassas que detenham maiores valores de TS e menores valores de IS, pois indicia uma maior velocidade de secagem inicial e uma maior facilidade de secagem global.

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.2 encontram-se os valores médios e respectivos desvios padrão da taxa de secagem (TS) e do índice de secagem (IS). Na Figura 3.37 e na Figura 3.38 podem ser consultados os resultados de TS e IS, respectivamente.

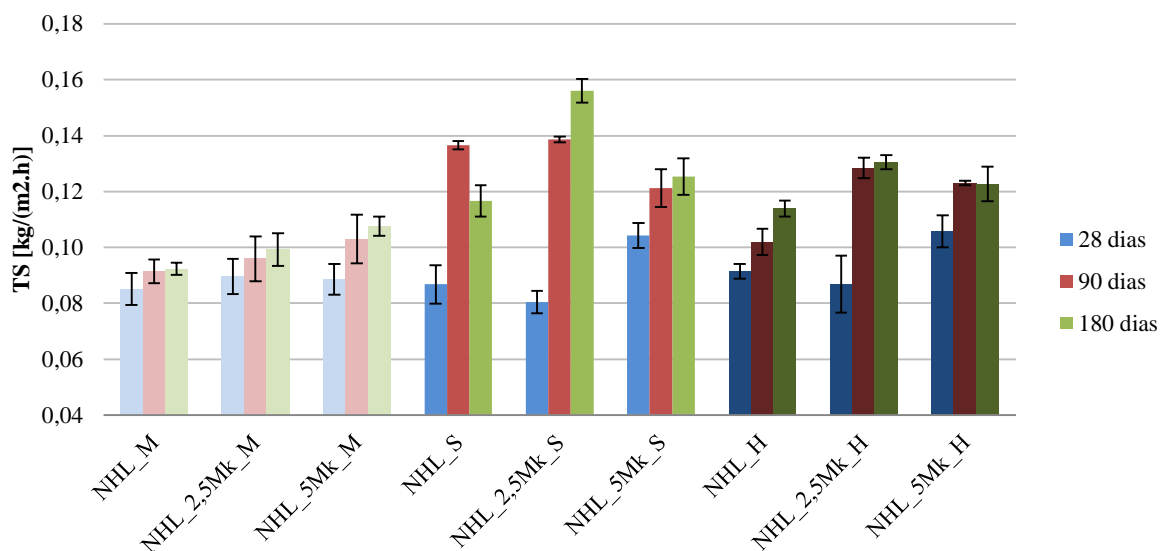


Figura 3.37 – Taxa de secagem das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

Observando a Figura 3.37 verifica-se que o valor médio máximo de TS foi obtido na argamassa NHL_2,5Mk_S aos 180 dias, enquanto o valor mínimo foi obtido na mesma argamassa mas aos 28 dias. Todas as argamassas registam valores de TS na ordem de 0,08-0,16 $[\text{kg/m}^2.\text{h}]$. Algumas arga-

massas, nomeadamente as de cura M, apresentam uma taxa de secagem crescente regularmente com a idade; outras argamassas apresentam variações elevadas nomeadamente dos 28 para os 90 dias (casos das argamassas em cura S sem e com 2,5% de Mk), o que é positivo.

Algumas argamassas, nomeadamente as de cura M, apresentam uma taxa de secagem crescente regularmente com a idade; outras argamassas apresentam variações elevadas nomeadamente dos 28 para os 90 dias (casos das argamassas em cura S sem e com 2,5% de Mk).

De um modo geral, dos 90 para os 180 dias regista-se uma tendência para o aumento de TS (excepto na NHL_S).

De seguida é feita uma análise da influência do teor em Mk na evolução de TS em cada cura e uma comparação entre argamassas idênticas sujeitas a condições de cura diferentes aos 28, 90 e 180 dias. Os valores de referência utilizados para a análise da influência do aumento de teor em metacaulino são os da argamassa sem metacaulino (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados como valores de referência os valores da cura *standard* (S).

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, verifica-se um aumento (ligeiro) da velocidade de secagem das argamassas (TS) com o aumento da percentagem de Mk. De seguida é feita uma análise da influência de metacaulino em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias e para as argamassas com cura M, verificou-se um ligeiro acréscimo de TS nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo este acréscimo semelhante nas duas argamassas com Mk; nas curas S e H registou-se uma ligeira diminuição de TS na argamassa NHL_2,5Mk e um aumento na argamassa NHL_5Mk.

90 dias

Aos 90 dias observou-se na cura M um ligeiro aumento de TS com o aumento da percentagem de Mk; na cura S, a TS da argamassa NHL_2,5Mk manteve-se semelhante à da argamassa NHL e a argamassa NHL_5Mk obteve uma diminuição do seu valor; na cura H, ambas as argamassas com Mk alcançaram um valor superior de TS em relação a NHL.

180 dias

Aos 180 dias a cura M apresentou uma evolução de TS semelhante à dos 90 dias; na cura S, as argamassas com Mk obtiveram um acréscimo de TS relativamente à argamassa sem Mk, NHL, sendo que a argamassa NHL_2,5Mk registou um maior acréscimo; na cura H verificou-se um aumento de TS nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk, apresentando a argamassa NHL_2,5Mk um valor superior ao de TS.

Influência da cura

Através de uma análise mais global da influência da cura verifica-se que as argamassas com cura S obtiveram maiores valores de TS. De seguida é feita uma análise da influência do tipo de cura em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias observaram-se na argamassa NHL, valores semelhantes de TS na cura M e, na cura H registou-se um ligeiro acréscimo de valores; na argamassa NHL_2,5Mk verificou-se um pequeno aumento de TS das curas M e H em relação a S; na argamassa NHL_5Mk verificou-se um decréscimo de TS na cura M, mantendo-se os valores inalterados na cura H quando comparados com a cura S.

90 dias

Aos 90 dias, a argamassa NHL apresentou uma diminuição de TS em ambas as curas M e H em relação a S; na argamassa NHL_2,5Mk obteve-se uma diminuição de TS em ambas as curas M e H em relação a S, apresentando a cura M o menor valor de TS; na argamassa NHL_5Mk, a cura M registou uma diminuição de TS e a cura H manteve valores semelhantes à cura S.

180 dias

Aos 180 dias, as argamassa NHL e NHL_5Mk registaram um decréscimo de TS na cura M, na cura H registaram-se valores semelhantes aos da cura de referência S; na argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e H registaram uma diminuição de TS, sendo a TS da cura H superior à da cura M.

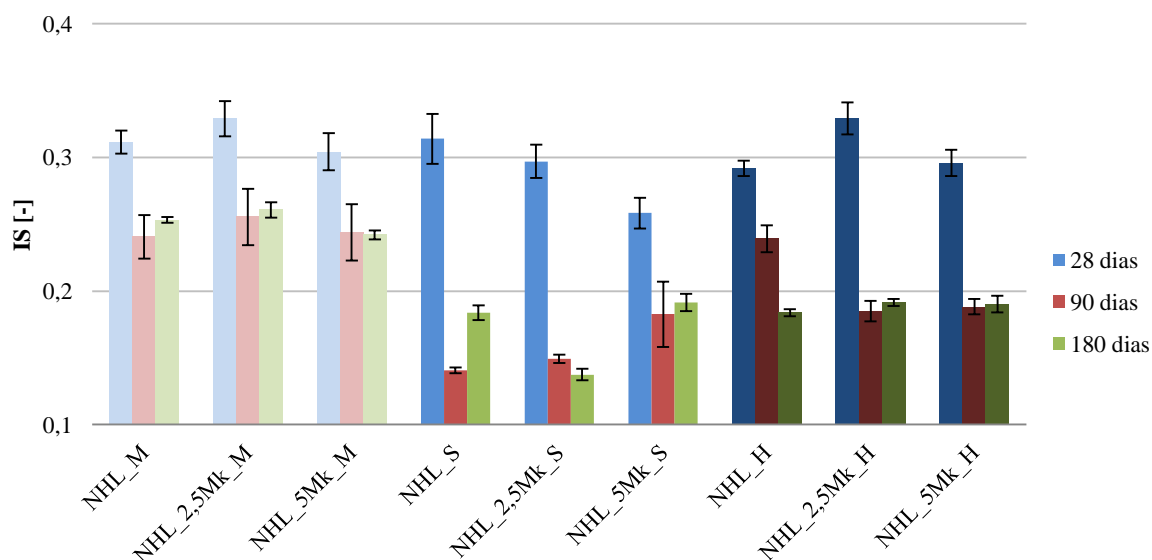


Figura 3.38 – Índice de secagem das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

Através da figura, verifica-se que o valor médio de IS máximo foi obtido nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_2,5Mk_H aos 28 dias; o valor mínimo foi obtido nas argamassas NHL_S e NHL_2,5Mk_S aos 90 e 180 dias, respectivamente. Em todas as argamassas registam-se valores de TS na ordem de 0,14-0,33.

Dos 28 para os 90 dias registou-se em todas as argamassas um decréscimo de IS (sendo este mais acentuada na argamassa NHL_S), o que é positivo. Dos 90 para os 180 dias, devido aos elevados desvios padrão de algumas das argamassas, torna-se difícil aferir sobre a evolução de IS com a idade de ensaio, não se registando nenhuma tendência óbvia.

Tendo como referência as argamassas sem Mk (NHL) para a análise da influência do aumento de teor em Mk na evolução de TS, e a cura *standard* (S) para a análise da influência da cura, analisam-se em seguida os impactos do teor de metacaulino e a influência da cura no valor de IS.

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, e analisando a Figura 3.38, não se verifica nenhuma tendência de variação explícita entre o IS e o aumento do teor de Mk nas argamassas.

Influência da cura

De um modo geral, as argamassas com cura M apresentam valores superiores de IS e as argamassas com cura S valores inferiores. De seguida é feita uma análise da influência do tipo de cura na evolução de IS em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias e na argamassa NHL, a cura M obteve um IS semelhante ao da cura de referência S e a cura H registou um ligeiro decréscimo; nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk verificou-se nas curas M e H um acréscimo semelhante de IS em relação à cura S.

90 dias

Aos 90 dias e na argamassa NHL, tanto a cura M como a cura H obtiveram um acréscimo semelhante de IS em relação a S; na argamassa NHL_2,5Mk, ambas as curas M e H registaram um aumento de IS, sendo esse aumento superior na cura M; na argamassa NHL_5Mk verificou-se na cura M um acréscimo de IS, tendo a cura H apresentado valores de IS semelhantes a S.

180 dias

Aos 180 dias e na argamassa NHL, verificou-se um aumento de IS na cura M, na cura H verificou-se um valor de IS semelhante ao da cura S; na argamassa NHL_2,5Mk, ambas as curas M e H obtiveram um incremento de IS em relação a S, sendo o incremento mais elevado na cura M; na argamassa NHL_5Mk, as curas M e H registaram um acréscimo semelhante de IS em relação a S.

3.4.1.6 Condutibilidade Térmica

O ensaio de condutibilidade térmica tem como objectivo determinar a grandeza λ [W/ (m.K)]. A condutibilidade térmica é uma característica própria de cada material, que traduz a forma como o material se deixa atravessar pelo calor, podendo ser definida como a quantidade de calor que atravessa a unidade de espessura do material por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura

(HENRIQUES, 2007). No caso de argamassas aplicadas como revestimento de paredes, a condutibilidade térmica deve ser a mais baixa possível, de forma a representar um maior contributo no isolamento térmico global da parede.

Antes de se iniciar o ensaio de condutibilidade térmica, os provetes vindos do ensaio de secagem permaneceram no mínimo 48 horas na sala de cura *standard* para que atingissem o equilíbrio com o ambiente de 65% de humidade relativa (HR).

Para a determinação da condutibilidade térmica utilizou-se o aparelho ISOMET 2104 (*Heat Transfer Analyser*) com a respectiva sonda de superfície API 210412 e uma placa de XPS para colocar sob o provete. O procedimento do ensaio foi baseado no manual do equipamento e descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Retirou-se do provete a película aderente utilizada nos dois ensaios anteriores – capilaridade e secagem. Colocou-se o provete sobre a placa de poliestireno extrudido (XPS). Colocou-se a sonda sobre uma das faces lisas do provete e seleccionou-se a opção *Thermal Conductivity*. Registou-se o valor da condutibilidade térmica, λ [W/ (m.K)], determinado pelo aparelho. Repetiu-se o ensaio noutra fase lisa do provete. Após o registo dos valores, calculou-se o valor da média e desvio padrão.



Figura 3.39 – Condutibilidade térmica em provete prismático

A sonda utilizada neste ensaio, por ser de maior dimensão que os provetes, não ficou em total contacto com a superfície do provete. Assim, os resultados obtidos apenas são comparáveis com dados obtidos em trabalhos que utilizaram provetes de geometria idêntica e o mesmo equipamento.

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.2 e na Figura 3.40 podem ser consultados os valores médios e respectivos desvios padrão da condutibilidade térmica das diferentes argamassas ensaiadas aos 28, 90 e 180 dias.

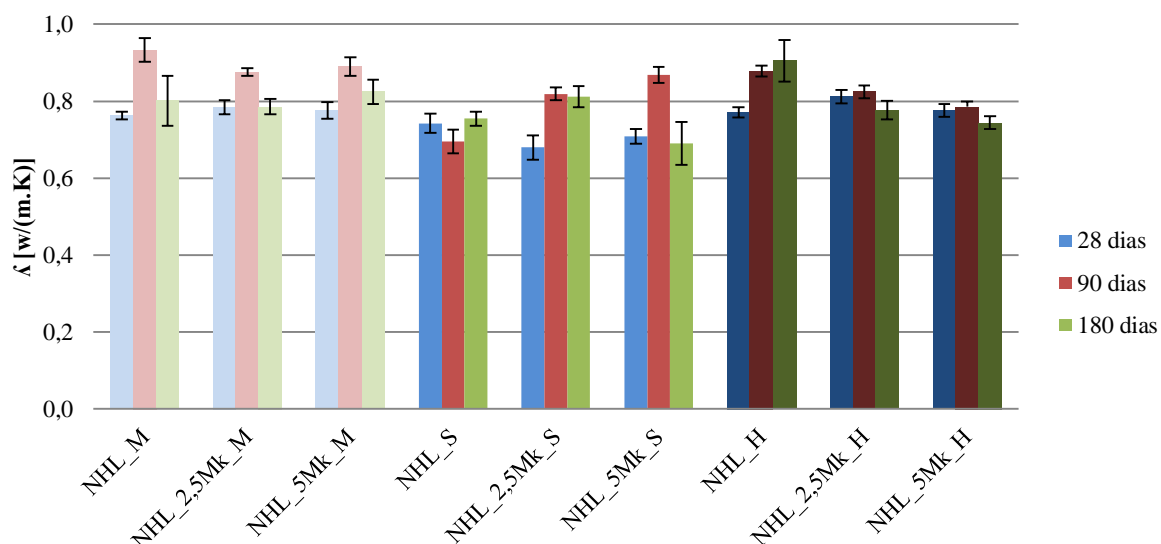


Figura 3.40 – Condutibilidade térmica dos provetes prismáticos de argamassas nas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 3.40 verifica-se que não existem grandes variações de λ nas diferentes argamassas, com o teor em metacaulino, nem às diferentes idades de ensaio. Todas as argamassas registam valores de λ na ordem de 0,7-0,9 [W/(m.K)].

Dos 28 para os 90 dias e em todas as argamassas, registou-se um ligeiro aumento de λ (excepto na argamassa NHL_S). Dos 90 para os 180 verifica-se um ligeiro decréscimo de λ na maioria das argamassas (excepto nas argamassas NHL_S e NHL_H).

Relativamente à influência do teor em metacaulino, devido aos resultados serem bastante variados, não é possível observar nenhuma tendência evidente.

De um modo geral, as argamassas com cura S obtiveram valores de λ mais baixos e as argamassas com cura M (seguidas de perto das argamassas H) valores mais altos.

3.4.1.7 Resistência aos Sulfatos

O ensaio da resistência aos sulfatos foi realizado com base na norma NP EN 12370 (IPQ, 2001), desenvolvida para o ensaio de pedras naturais. De acordo estudos anteriores, a concentração da solução de imersão especificada na norma é demasiado destrutiva para provetes de cal. Deste modo, utilizou-se uma concentração da solução de imersão de 3,09% de sulfato de sódio anidro (FARIA, 2004) – metade do valor indicado pela norma. O procedimento realizado neste ensaio descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Secaram-se os provetes na estufa ventilada a 105° C até atingirem massa constante. Preparou-se uma solução não saturada de sulfato de sódio anidro a 3,09% obtida através da adição 164,5g de sulfato de sódio (Na_2SO_4) por cada 5 litros de água a 20-25°C – solução utilizada ao longo de todos os ciclos de ensaio. Colocou-se um estrado de plástico no fundo de uma caixa de plástico e inseriu-se a solução. Depois de atingirem massa constante, retiraram-se e deixaram-se arrefecer os provetes durante cerca de 30 minutos. Pesaram-se os provetes. Colocaram-se os provetes na solução de sulfato de sódio durante 2 horas, garantindo um espaçamento mínimo de 10 mm entre provetes, 20 mm entre provetes e bordos da caixa e de 8 ± 2 mm de altura de solução acima do topo dos provetes (Figura 3.41a). Após 2 horas de imersão, retiraram-se os provetes da solução e colocaram-se numa grelha durante alguns minutos, até que o excesso de solução fosse escorrido (Figura 3.41b). Aos 90 e 180 dias colocaram-se os provetes na estufa durante vários dias até que atingiram massa constante ($\Delta\text{massa} < 0,1\%$ entre 24h), de modo a determinar a quantidade de sulfatos retida após o primeiro ciclo; em todos os restantes ciclos, a secagem foi efectuada em períodos mínimos de 24h (independentemente de ter sido atingida a massa constante). Concluída a secagem, deixaram-se arrefecer os provetes durante cerca de 30 minutos. Repetiu-se o ciclo imersão/secagem/pesagem durante 20 dias úteis – 20 ciclos.



Figura 3.41 – a) Imersão dos provetes; b) Colocação dos provetes no estrado metálico

Concluídos os 20 ciclos, traçaram-se as curvas de variação de massa ao longo do ensaio. A variação de massa é dada pela seguinte equação:

$$\Delta M = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

ΔM [%] - variação da massa;

m_i [g] - massa do provete no final do ciclo i ;

m_0 [g] - massa inicial do provete.

Resultados obtidos no ensaio

No Figura 3.42 apresentam-se as percentagens mássicas de sulfatos retidos resultantes do primeiro ciclo de imersão/secagem aos 90 e 180 dias. A Figura 3.43, Figura 3.44 e Figura 3.45 registam a evolução do ensaio de resistência aos sulfatos das diversas argamassas aos 28, 90 e 180 dias, respectivamente.

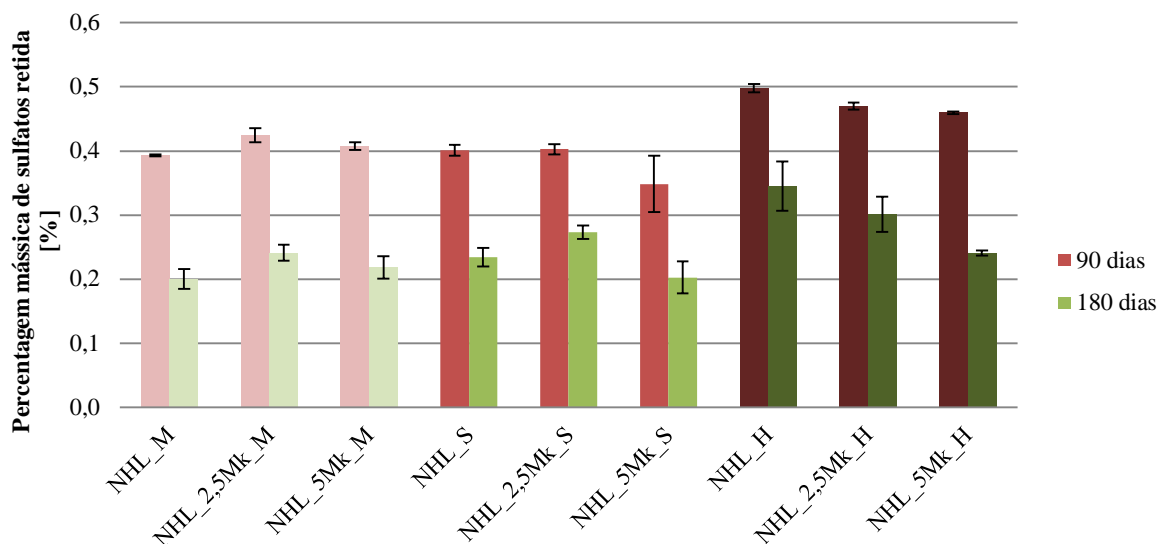


Figura 3.42 – Percentagem mássica retida das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e aos 180 dias

Analisando a Figura 3.42 verifica-se que a quantidade de sulfatos retidos no 1º ciclo diminuiu das argamassas analisadas aos 90 dias para as analisadas aos 180 dias. Observa-se que a argamassa que em média reteve mais sulfatos foi a argamassa NHL_H aos 90 dias; a argamassa NHL_5Mk_S obteve o valor mínimo de percentagem mássica de sulfatos retida. Registou-se um intervalo de percentagem mássica retida na ordem de 0,2-0,5 %.

Na Figura 3.43 é possível observar que, aos 28 dias, as argamassas NHL (sem metacaulino) foram as argamassas que resistiram a maior número de ciclos até perderem 100% da sua massa, sendo a argamassa NHL_M a mais resistente entre todas as argamassas ensaiadas (resistindo até ao 19º ciclo). As argamassas que apresentaram menor resistência foram as argamassas NHL_2,5Mk (com 2,5% de Mk), e nomeadamente a de cura S que perdeu grande parte da sua massa logo no 5º ciclo

Observando a Figura 3.44 destaca-se genericamente uma melhoria face aos 28 dias por parte das argamassas S e M, e um pior comportamento das argamassas H. Verifica-se que, aos 90 dias, as argamassas com cura H foram as que menos resistiram ao ataque dos sulfatos (perdendo a totalidade da sua massa antes do 11º ciclo), sendo que dentro das argamassas com cura H, a argamassa NHL_H foi a que mais ciclos resistiu e a argamassa NHL_5Mk a que menos resistiu - as argamassas com cura H iniciaram as primeiras perdas de massa entre os ciclos 4 e 7. As argamassas NHL_2,5Mk_M e NHL_5Mk_M registaram uma resistência aos sulfatos intermédia, com perdas de massa de 56% e 26%, respectivamente, ao 20º ciclo. As argamassas que registaram maior resistência foi a argamassa

NHL_M (que sofreu uma perda de massa insignificante na ordem dos 0,10%) e todas as argamassas com cura S.

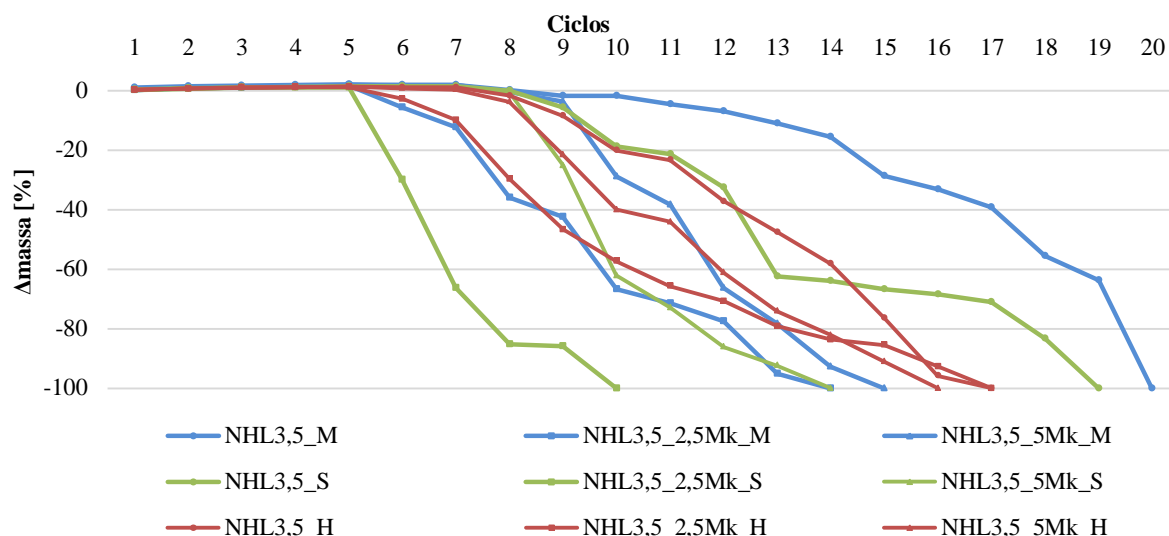


Figura 3.43 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 28 dias

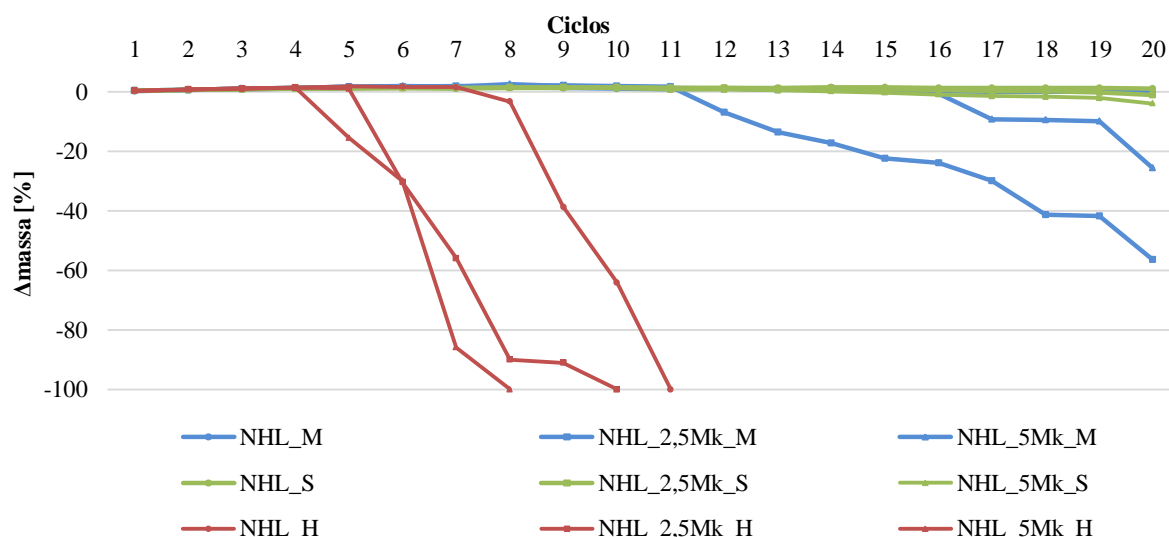


Figura 3.44 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 90 dias

Analisando a Figura 3.45 observa-se uma melhoria do comportamento de todas as argamassas face aos 28 dias, enquanto face aos 90 dias se regista uma estabilização do comportamento das argamassas M, uma melhoria das H e um pior comportamento das S. Verifica-se que, aos 180 dias, a primeira perda de massa das argamassas se deu entre o 5º ciclo e o 7º ciclo. A argamassa que registou menos resistência foi a argamassa NHL_5Mk_S, que ao 20º ciclo registou uma perda de cerca de 76% da sua massa inicial, seguida das argamassas NHL_2,5Mk_S e NHL_M, que ao 20º ciclo sofreram uma perda de cerca de 58% e 50%, respectivamente. As restantes argamassas registaram perdas de

massa de 15% a 32% da sua massa inicial. As argamassas mais resistentes aos sulfatos foram as argamassas NHL_2,5Mk_H e NHL_S, com perdas mássicas de cerca de 15% e 17%, respectivamente.

Analisando a influência da idade na resistência aos sulfatos, através da comparação das três figuras anteriores, verifica-se que, com o aumento da idade, todas as argamassas indiciam uma significativa melhoria das suas resistências aos sulfatos.

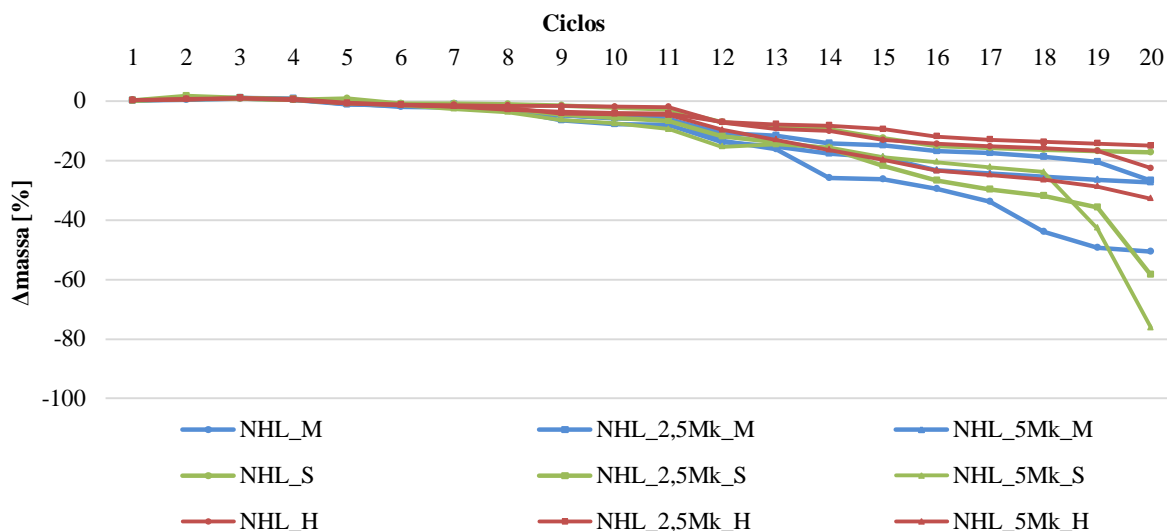


Figura 3.45 – Resistência aos sulfatos das argamassas de curas M, S e H aos 180 dias

3.4.1.8 Porosidade Aberta e Massa Volúmica

Para a realização do presente ensaio utilizaram-se os topos íntegros dos meios provetes resultantes do ensaio de resistência à compressão.

Os procedimentos levados a cabo nestes ensaios tiveram como base a norma NP EN 1936 (IPQ, 2008), que, por serem direccionados para pedras naturais, sofreram algumas alterações. O procedimento realizado descreve-se em seguida.

Procedimento experimental

Colocaram-se os topos dos provetes em estufa de 60° C durante 48 horas. Retiraram-se as amostras da estufa e deixaram-se arrefecer. Pesaram-se os provetes numa balança de precisão 0,001g (m_1). Colocaram-se os provetes dentro de um exsiccador estanque. Ligou-se a bomba de vácuo durante 24 horas para que o ar dos provetes e do exsiccador fosse completamente removido (Figura 3.46a). Ao fim destas 24 horas e para que os vazios outrora preenchidos por ar ficassem preenchidos por água, fez-se penetrar lentamente água no exsiccador, durante mais de 15 minutos e até que os provetes estivessem completamente submersos (Figura 3.46b). Após 24 horas de imersão em água e em vácuo dos provetes (48 horas após a colocação dos provetes dentro do exsiccador), desligou-se a bomba de vácuo e abriram-se as entradas de ar do exsiccador, ficando os provetes imersos em água e à pressão ambien-

te. Concluídas 72 horas após a sua colocação, retiraram-se os provetes do exsiccador e de imediato fizeram-se as duas medições: a pesagem hidrostática (m_2), colocando os provetes um a um num cesto acoplado à parte inferior da balança que se encontrava imerso dentro de água, possibilitando a pesagem em imersão (Figura 3.47a); e a pesagem saturada (m_3), colocando os provetes sobre um pano húmido para que o excesso de água envolvente fosse retirado, possibilitando a pesagem dos provetes saturados (Figura 3.47b e Figura 3.47c).

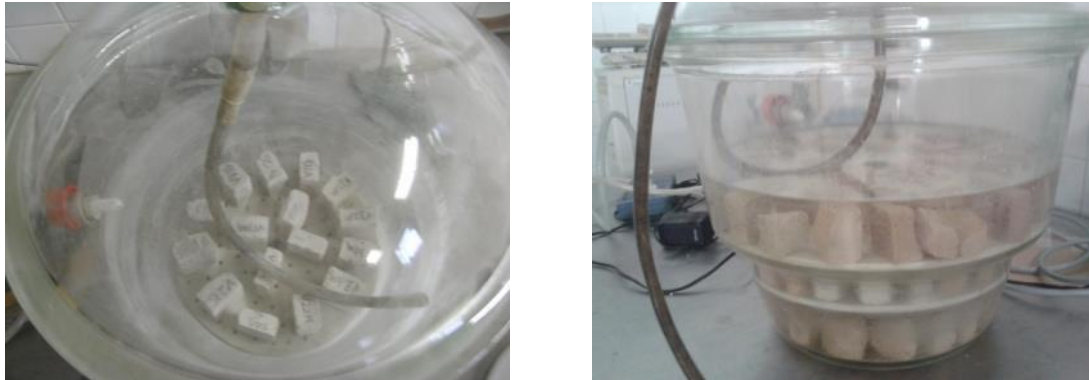


Figura 3.46 – a) Provetes em vácuo; b) Provetes submersos



Figura 3.47 – a) Pesagem hidrostática; b) Remoção do excesso de água; c) Pesagem saturada

Depois de determinadas as m_1 , m_2 e m_3 calculou-se a porosidade aberta (Equação 3.11) e o valor da massa volúmica (Equação 3.12).

$$Pab = \frac{m_3 - m_1}{m_3 - m_2} \times 100 \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde:

Pab [%] - porosidade aberta;

m_1 [g] - massa da amostra seca;

m_2 [g] - massa hidrostática da amostra;

m_3 [g] - massa saturada da amostra.

$$MV = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times 10^3 \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:

MV [kg/m³] - massa volúmica;

m_1 [g] - massa da amostra seca;

m_2 [g] - massa hidrostática da amostra;

m_3 [g] - massa saturada da amostra.

Resultados obtidos no ensaio

No Quadro 4.2, na Figura 3.48 e na Figura 3.49 podem ser consultados os valores médios e os respectivos desvios padrão da porosidade aberta (Pab) e da massa volúmica (MV), respectivamente, aos 28, 90 e 180 dias.

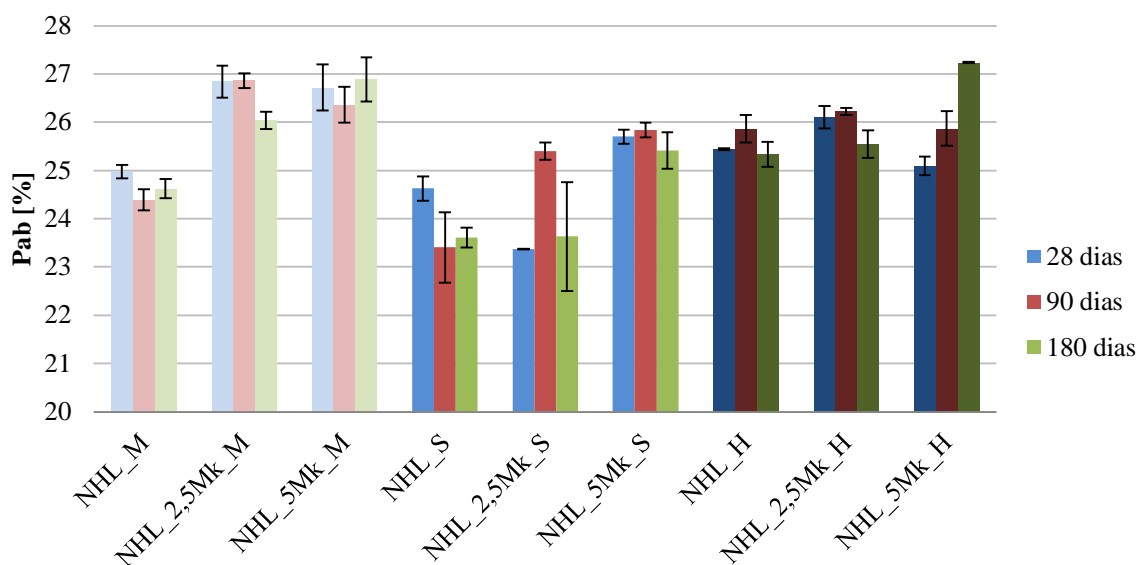


Figura 3.48 – Porosidade aberta das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias

A análise da Figura 3.48 permite observar que os valores da Pab de todas as argamassas foram consistentes, variando entre cerca de 23,5% e 27,0%. Nas argamassas NHL_S e NHL_2,5Mk_S obtiveram-se desvios padrão elevados. O valor médio máximo de Pab foi obtido na argamassa NHL_5Mk_H aos 180 dias; o valor mínimo foi alcançado na argamassa NHL_2,5_S aos 28 dias.

Dos 28 para os 90 dias registou-se genericamente um decréscimo do valor médio de Pab na argamassa NHL_S e nas argamassas com cura M (ligeiro) e um acréscimo nas argamassas NHL_5Mk_S, NHL_2,5Mk e nas argamassas com cura H. De um modo geral, dos 90 para os 180 dias verificou-se, na argamassa NHL_5Mk_H e nas argamassas com cura M, um aumento de Pab (sendo este aumento maior na NHL_5Mk_H), um decréscimo na cura S e também nas argamassas NHL_H e NHL_2,5Mk_H.

Tendo como referência as argamassas sem metacaulino (NHL) analisou-se a influência do aumento de teor em Mk na evolução de Pab, e usou-se como referência a cura *standard* (S) para a análise de argamassas idênticas sujeitas a condições de cura diferentes.

Influência do teor de metacaulino

Genericamente, sem particularizar a idade, regista-se uma tendência para o aumento de Pab (e diminuição da compacidade das argamassas) com o teor em Mk. De seguida é feita uma análise mais pormenorizada aos 28, 90 e 180 dias.

28 dias

Aos 28 dias registou-se na cura M um aumento de Pab das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo este aumento semelhante entre as duas argamassas com Mk; na cura S a argamassa NHL_2,5Mk registou um decréscimo e a argamassa NHL_5Mk contou com um acréscimo de Pab em relação a NHL; na cura H verificou-se na argamassa NHL_2,5Mk um aumento de Pab e a argamassa NHL_5Mk apresentou um valor semelhante à argamassa NHL.

90 dias

Aos 90 dias registou-se na cura M e S um aumento de Pab das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa NHL; na cura H, as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk apresentaram valores semelhantes aos da argamassa de referência, NHL.

180 dias

Aos 180 dias e relativamente à cura M obteve-se um aumento de Pab nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo este acréscimo superior na argamassa NHL_5Mk; nas curas S e H a argamassa NHL_2,5Mk registou um valor semelhante de Pab e a argamassa NHL_5Mk um valor superior à argamassa NHL.

Influência da cura

Uma análise mais global permite constatar que a cura S conduz a argamassas de menor porosidade (maior compacidade) e a cura M maior porosidade (menor compacidade). Em seguida analisam-se estas tendências em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias, na argamassa NHL a cura M registou um valor semelhante e a cura H um ligeiro aumento do valor de Pab em relação à cura de referência, S; na argamassa NHL_2,5Mk verificou-se um aumento semelhante de Pab nas curas M e H; na argamassa NHL_5Mk verificou-se um acréscimo de Pab na cura M e um decréscimo na cura H em relação a S.

90 dias

Aos 90 dias, nas argamassas NHL e NHL_2,5Mk registou-se um aumento de Pab nas curas M e H em relação à cura de referência S; na argamassa NHL_5Mk, a cura M obteve um valor de Pab ligeiramente superior ao de S, enquanto a cura H apresenta valor semelhante à cura S.

180 dias

Aos 180 dias, em todas as argamassas registou-se um aumento de Pab nas curas M e H em relação à cura de referência.

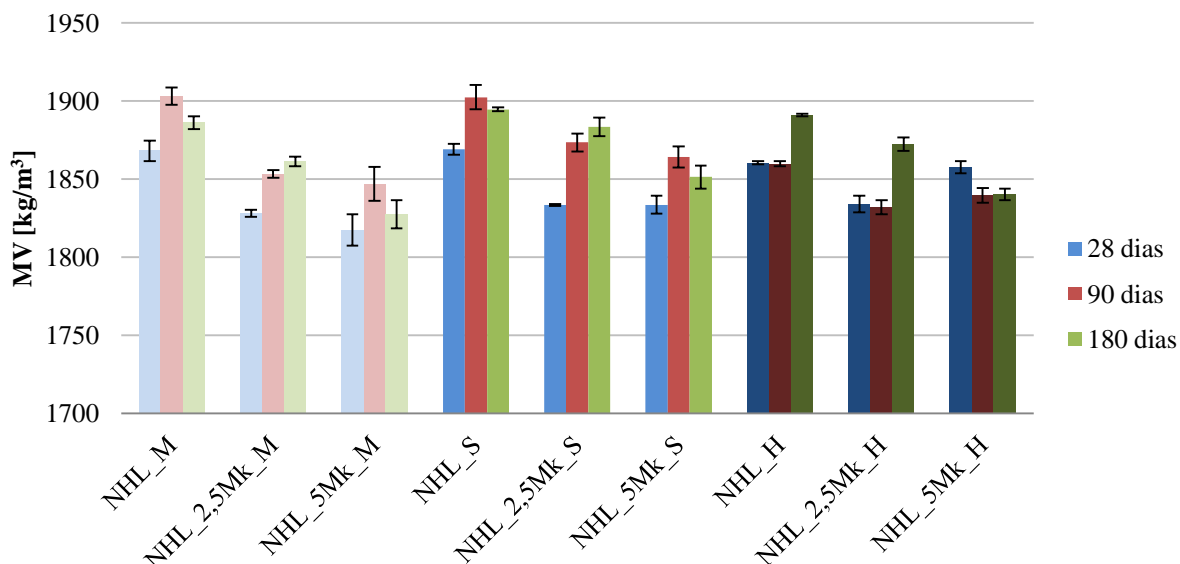


Figura 3.49 – Massa volúmica das argamassas nas curas M, S e H aos 28, 90 e 180 dias

Tal como em Pab, a análise da Figura 3.49 permite verificar uma uniformidade entre os valores de MV, variando entre 1817 a 1903 [kg/m³]. O valor médio máximo de MV ocorreu simultaneamente nas argamassas NHL_M e NHL_S, ou seja, estas argamassas aparentam uma maior compactidade.

De um modo geral, dos 28 para os 90 dias verifica-se um acréscimo de MV em todas as argamassas, exceptuando as argamassas com cura H. Dos 90 para os 180 registou-se genericamente uma ligeira diminuição de MV nas argamassas com cura M e S (com a excepção da NHL_2,5Mk_M e NHL_2,5Mk_S) e um aumento nas argamassas com cura H (excepto na NHL_5Mk_H).

De seguida é feita uma análise da influência do teor em Mk na evolução de MV e uma análise da influência do tipo de cura. Os valores de referência utilizados para a análise da influência do teor em Mk foram os da argamassa sem Mk (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados os valores da cura *standard* (S).

Influência do teor de metacaulino

Uma análise global da Figura 3.49 permite verificar uma ligeira tendência para a diminuição de MV (diminuição da compactidade das argamassas) com o aumento do teor em Mk. De seguida é feita uma análise da influência do teor de metacaulino aos 28, 90 e 180 dias.

28 dias

Aos 28 dias registou-se na cura M uma diminuição da MV das argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk em relação à argamassa de referência NHL, sendo o valor da MV da argamassa NHL_2,5Mk ligeiramente superior ao da argamassa NHL_5Mk; na cura S as argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk registaram um decréscimo semelhante da MV; na cura H verificou-se na argamassa

NHL_2,5Mk uma diminuição da MV e a argamassa NHL_5Mk apresentou valores semelhantes a NHL.

90 dias

Aos 90 dias registou-se nas argamassas com cura M, S e H uma evolução decrescente de MV com o aumento do teor em Mk, sendo o valor da argamassa NHL_2,5Mk ligeiramente superior ao da NHL_5Mk.

180 dias

Tal como aos 90 dias, aos 180 registou-se nas argamassas com cura M, S e H uma evolução decrescente da MV com o aumento do teor em Mk, apresentando a argamassa NHL_2,5Mk um MV ligeiramente superior à da NHL_5Mk.

Influência da cura

Genericamente registam-se valores mais altos de MV (maior compacidade) na cura S. De seguida é feita uma análise da influência do tipo de cura na evolução da MV em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias, para as argamassas NHL e NHL_2,5Mk as curas M e H registaram um valor de MV semelhante ao da cura de referência, S; na argamassa NHL_5Mk verificou-se na cura M um decréscimo de MV e na cura H um acréscimo em relação a S.

90 dias

Aos 90 dias, para a argamassa NHL, a cura H registou uma diminuição de MV em relação à cura de referência S, e a cura M apresentou um valor semelhante à cura S; nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk, as curas M e H obtiveram um valor de MV inferior quando comparadas com a cura S, apresentando a cura M um valor superior ao da cura H.

180 dias

Aos 180 dias, para a argamassa NHL as curas M e H apresentaram um valor de MV ligeiramente inferior à cura S, sendo o valor da cura M inferior ao da cura H; as argamassas NHL2,5_MK e NHL_5Mk registam nas curas M e H um ligeiro decréscimo da MV em relação a S.

3.4.2. Caracterização de Provetes de Argamassa sobre Suporte de Tijolo

Tal como referido no ponto 3.4, os provetes de argamassa sobre suporte de tijolo foram ensaiados aos 28, 90 e 180 dias. À semelhança do sucedido com os provetes prismáticos, antes do início dos ensaios, os provetes que se encontravam na cura húmida (H) e na cura marítima (M) foram colocados cerca de 24 horas na sala de cura *standard* (S). Recorda-se que os provetes de argamassa sobre tijolos foram sujeitos aos três tipos de curas utilizados com os provetes prismáticos e ainda à cura a 65% de HR com aspersão inicial nos primeiros dias, SP.

Neste capítulo encontram-se detalhados os ensaios realizados aos provetes de argamassa sobre suporte de tijolo em estado endurecido. Os diferentes ensaios e as respectivas normas de base utilizadas podem ser consultados no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Caracterização de provetes de argamassa sobre suporte de tijolo no estado endurecido

Ensaio	Norma de base
Condutibilidade térmica	Manual do equipamento
Velocidade de propagação dos ultra-sons	Fe Pa 43 (LNEC, 2010)
Absorção de água sob baixa pressão	Fe Pa 39 (LNEC, 2002)e Test No. II.4 (RILEM, 1980b)

Embora os ensaios indicados no Quadro 3.12 sejam do tipo não destrutivo, a sua sequência de execução foi essencial, dado que, certos ensaios influenciam os resultados dos subsequentes. Deste modo, o primeiro ensaio efectuado foi o de condutibilidade térmica, seguido do de velocidade de propagação de ultra-sons e por fim foi realizado o ensaio de absorção de água sob baixa pressão.

3.4.2.1 Condutibilidade Térmica

O procedimento utilizado no ensaio de condutibilidade térmica a provetes em suporte de tijolo foi análogo ao realizado em 3.4.1.6 a provetes prismáticos, com a diferença dos pontos ensaiados e do facto de a sonda estar na sua totalidade em contacto com o provete. No entanto, e contrariamente ao definido no procedimento de ensaio do equipamento, a camada de argamassa sobre o tijolo, não chega a ter 2 cm recomendados como mínimo.

Para este ensaio realizaram-se 6 medições por tijolo. O valor da condutibilidade térmica, λ [W/(m.K)], bem como o desvio padrão de cada tijolo corresponde, assim, à média dos 6 valores lidos pelo aparelho.



Figura 3.50 – Ensaio de condutibilidade térmica a provetes em suporte de tijolo

Resultados obtidos no ensaio

Na Figura 3.51 e no Quadro 4.3 podem ser consultados os valores médios e respectivos desvios padrão da condutibilidade térmica das diferentes argamassas ensaiadas aos 28,90 e 180 dias.

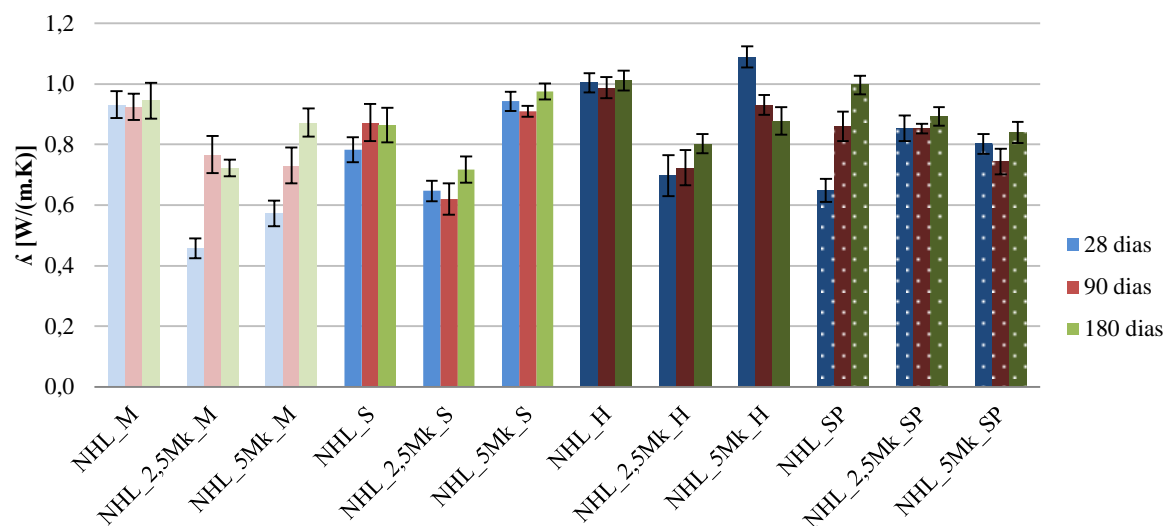


Figura 3.51 – Condutibilidade térmica dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias

Uma análise mais geral da Figura 3.51 permite constatar que houve uma variação de λ na gama de 0,4-1,1 [W/(m.K)]. A cura H apresenta valores médios superiores e a cura M valores genericamente inferiores (excepto no caso da argamassa sem Mk, NHL).

3.4.2.2 Velocidade de Propagação de Ultra-Sons

O presente ensaio permite avaliar a homogeneidade da argamassa e detectar descontinuidades internas, através da velocidade de propagação de ultra-sons. Para a sua realização utilizou-se um aparelho emissor-receptor de ultra-sons e um gel condutor.

O procedimento de ensaio teve como base a ficha de ensaio Fe Pa 43 (LNEC, 2010) e detalha-se em seguida.

Procedimento experimental

Conforme o esquema da Figura 3.52a, mediram-se e marcaram-se 6 pontos (de A a F) na superfície do provete. De forma a melhorar o contacto entre o provete e os transdutores, aplicou-se o gel condutor nos pontos de leitura. Fixou-se o transdutor emissor no ponto A e colocou-se o transdutor receptor sucessivamente nos pontos B,C,D,E e F, registando-se o tempo de propagação de A para cada

um desses pontos (Figura 3.52b). Repetiu-se o processo descrito no ponto anterior, fixando o transdutor emissor no ponto F.

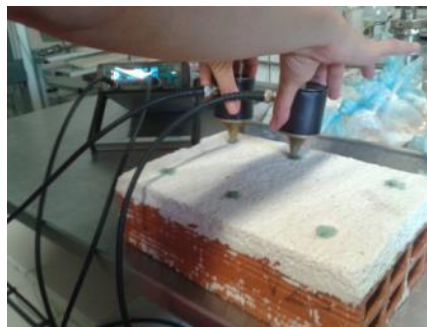
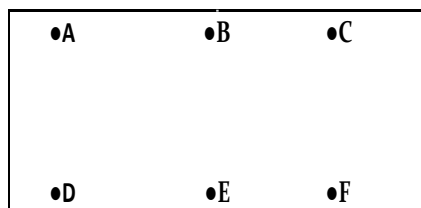


Figura 3.52 – a) Esquema da marcação dos pontos; b) Realização do ensaio

Calculou-se velocidade de propagação dos ultra-sons (em m/s) dividindo a distância percorrida (em m) pelo tempo decorrido (em s).

Resultados obtidos no ensaio

Na Figura 3.53 e no Quadro 4.3 encontram-se os valores médios e os respectivos desvios padrão da velocidade de propagação de ultra-sons (v_{prop}) aos 28 e 90 dias. Devido a uma avaria ocorrida no aparelho de medição, não foi possível realizar o ensaio aos 180 dias.

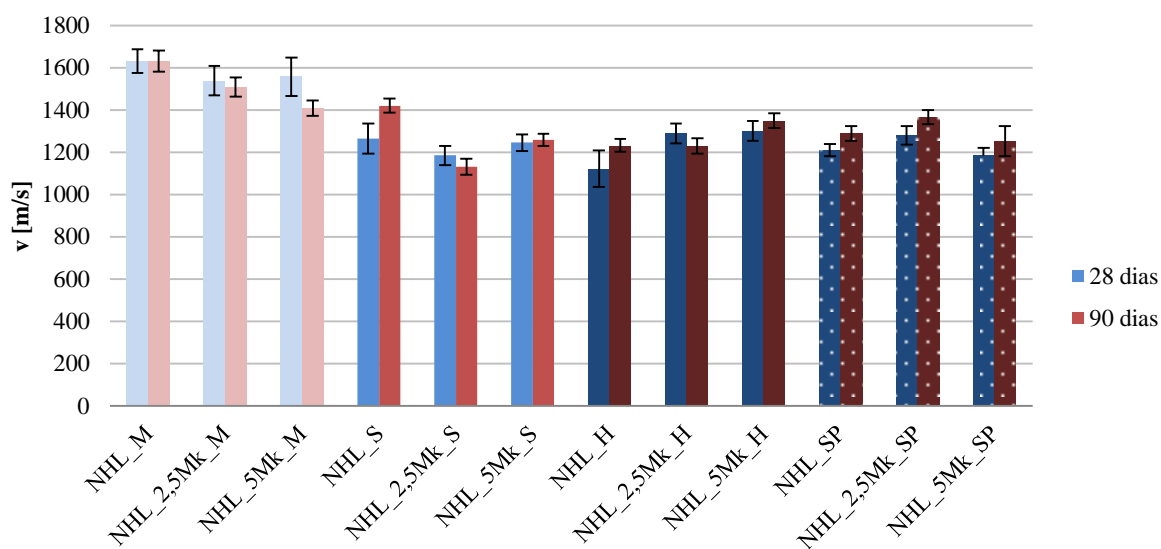


Figura 3.53 – Velocidade de propagação de ultra-sons dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28 e 90 dias

A análise da Figura 3.53 permite observar uma uniformidade de valores de v_{prop} entre argamassas de cada cura, registrando a cura M valores mais elevados e a cura S valores mais baixos. Todas as argamassas registam valores de v_{prop} na ordem de 1130-1650 m/s.

3.4.2.3 Absorção de Água sob Baixa Pressão – Tubos de Karsten

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão realizou-se de acordo com a ficha de ensaio Fe Pa 39 (LNEC, 2002) e com Test N°.II.4 da RILEM (RILEM, 1980a). Este método pode ser utilizado tanto *in-situ* como em laboratório e avalia a resistência à água líquida da superfície, através absorção de água da argamassa sob baixa pressão. Esta característica, conhecida como permeabilidade à água, define-se pela aptidão dos materiais de serem atravessados por um fluido, quando submetidos a um gradiente de pressão (APPS, 2001).

Para este ensaio utilizaram-se tubos de Karsten verticais com graduação dos 0 aos 4ml e material de fixação, no caso uma plasticina. O procedimento experimental detalha-se em seguida.

Procedimento experimental

Mediram-se os diâmetros de 3 tubos de Karsten. Colocou-se a plasticina estanque no bordo interior do tubo que fica em contacto com o revestimento do tijolo. Com alguma pressão, fixaram-se os tubos ao tijolo. Aplicou-se plasticina em torno dos tubos de modo a garantir a estanquidade (Figura 3.54). Com um esguicho, encheu-se o primeiro tubo com água até aos 0 ml e deu-se início à contagem do tempo. Passado 1 minuto, encheu-se o segundo tubo e passados 2 minutos, encheu-se o terceiro tubo – desfasamento de 1 minuto entre o enchimento de cada tubo. Registou-se a quantidade de água absorvida aos 5, 10, 15, 30 e 60 minutos. Sempre que num tubo se atingiu a marca dos 4ml, registou-se o tempo decorrido e voltou a encher-se o mesmo até à marca 0 ml. Finalizado o ensaio, calculou-se a média do tempo de absorção de água em cada um dos 3 tubos de cada provete.



Figura 3.54 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão – tubos de Karsten

Esta técnica de ensaio permite avaliar a capacidade de absorção de uma argamassa através da quantidade de água absorvida num determinado período de tempo, ou calcular o tempo necessário para

absorver uma determinada quantidade de água, por exemplo os 4 ml de água de cada tubo. Através da Equação 3.13 e dos resultados do ensaio, calculou-se o coeficiente de absorção de água aos Z minutos.

$$Ca_z = \frac{w_{mZ} \times 10^{-3}}{\varnothing_m^2 \times \frac{\pi}{4} \times 10^{-6} \times Z^{1/2}} \quad \text{Equação 3.13}$$

Onde:

Ca [$\text{kg}/(\text{m}^2\sqrt{\text{min}})$] - coeficiente de absorção;

w_{mZ} [ml] - quantidade de água absorvida em Z minutos;

\varnothing_m [mm] - diâmetro médio do tubo em contacto com a argamassa (24,73 mm).

Resultados obtidos no ensaio

Na Figura 3.55 são apresentados os coeficientes de absorção de água aos 60 minutos de ensaio. No Quadro 4.3 podem ser consultados todos os resultados relativos ao presente ensaio. A realização deste ensaio foi particularmente difícil dada falta de aderência entre a plasticina e o revestimento de argamassa. Não foi possível ensaiar a argamassa NHL_2,5Mk_H, visto que na altura do ensaio a argamassa encontrava-se partida em vários fragmentos.

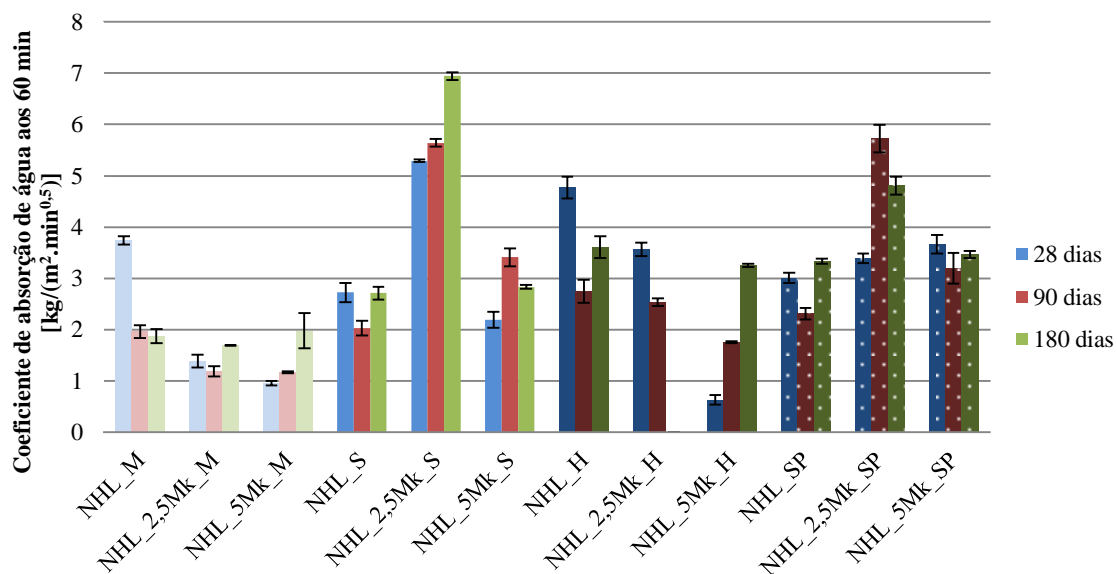


Figura 3.55 – Coeficiente de absorção aos 60 min dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 3.55 verifica-se que a argamassa com maior Ca_{60} médio foi a NHL_2,5Mk_S aos 180 dias; a argamassa que obteve uma velocidade de absorção de água mais baixa foi a NHL_5Mk_H aos 28 dias. Registou-se uma ampla gama de Ca_{60} na ordem de 0,63-6,5 [$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{min}^{0.5})$] entre todas as argamassas.

Com a idade, não se verifica nenhuma tendência óbvia para o Ca_{60} .

De seguida é feita uma análise da influência do teor em metacaulino na evolução de Ca_{60} em cada cura e uma comparação entre argamassas idênticas sujeitas a condições de cura diferentes aos 28, 90 e 180 dias. Os valores de referência utilizados para a análise da influência do aumento de teor em metacaulino são os da argamassa sem metacaulino (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados como valores de referência os valores da cura *standard* (S).

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, não se verifica nenhuma tendência global para Ca_{60} com o aumento do teor de metacaulino. De seguida é feita uma análise a cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias, verificou-se nas curas M e H um decréscimo de Ca_{60} em todas as argamassas com Mk, em comparação com a argamassa de referência NHL, sendo o decréscimo mais acentuado na argamassa NHL_5Mk; na cura S, a argamassa NHL_2,5Mk registou um aumento de Ca_{60} em relação à argamassa NHL, e a argamassa NHL_5Mk, um decréscimo; na cura SP verificou-se uma evolução crescente de Ca_{60} com o aumento do teor em Mk.

90 dias

Aos 90 dias, obteve-se nas curas M e H um decréscimo de Ca_{60} em todas as argamassas com Mk em relação à argamassa NHL; as curas S e SP apresentaram nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk um Ca_{60} superior em relação a NHL, sendo mais elevado na argamassa NHL_2,5Mk.

180 dias

Aos 180 dias, registaram-se na cura M valores semelhantes de Ca_{60} entre todas as argamassas; nas curas S e SP, a argamassa NHL_2,5Mk obteve um acréscimo de Ca_{60} em relação a NHL e a argamassa NHL_5Mk apresentou um valor semelhante; na cura H, a argamassa NHL_5Mk registou um valor ligeiramente mais baixo de Ca_{60} em relação ao valor da argamassa NHL. Tal como referido anteriormente, não se obtiveram dados para NHL_2,5Mk_H aos 180 dias.

Influência da cura

De um modo geral, as curas S e SP registaram maiores valores de Ca (maior absorção de água), enquanto a cura M registou os menores valores (menor absorção de água).

28 dias

Aos 28 dias, registou-se para argamassa NHL um aumento de Ca_{60} nas curas M, H e SP em relação à cura de referência S, apresentando a cura H um maior valor; na argamassa NHL_2,5Mk obteve-se um decréscimo de Ca_{60} nas curas M, H e SP, sendo o decréscimo mais acentuado na cura M; na argamassa NHL_5Mk, as curas M e H apresentaram um menor valor de Ca_{60} em relação a S, a cura SP apresenta maiores valores de Ca_{60} .

90 dias

Aos 90 dias, registou-se, na argamassa NHL, um acréscimo de Ca_{60} nas curas H e SP em relação a S, a cura M apresenta valores semelhantes; nas argamassas NHL_2,5Mk e NHL_5Mk registou-se uma diminuição de Ca_{60} nas curas M e H em relação a S, a cura SP apresenta valores semelhantes.

180 dias

Aos 180 dias, verificou-se na argamassa NHL um acréscimo de Ca nas curas H e SP em relação a S, enquanto na cura M se verificou um decréscimo; na argamassa NHL_2,5Mk, as curas M e SP sofreram uma diminuição de Ca em relação a S, apresentando a cura SP um Ca superior ao da cura M; na argamassa NHL_5Mk, obteve-se um acréscimo de Ca nas curas H e SP e um decréscimo na cura M em relação à cura S. Não se obtiveram dados para NHL_2,5Mk_H aos 180 dias.

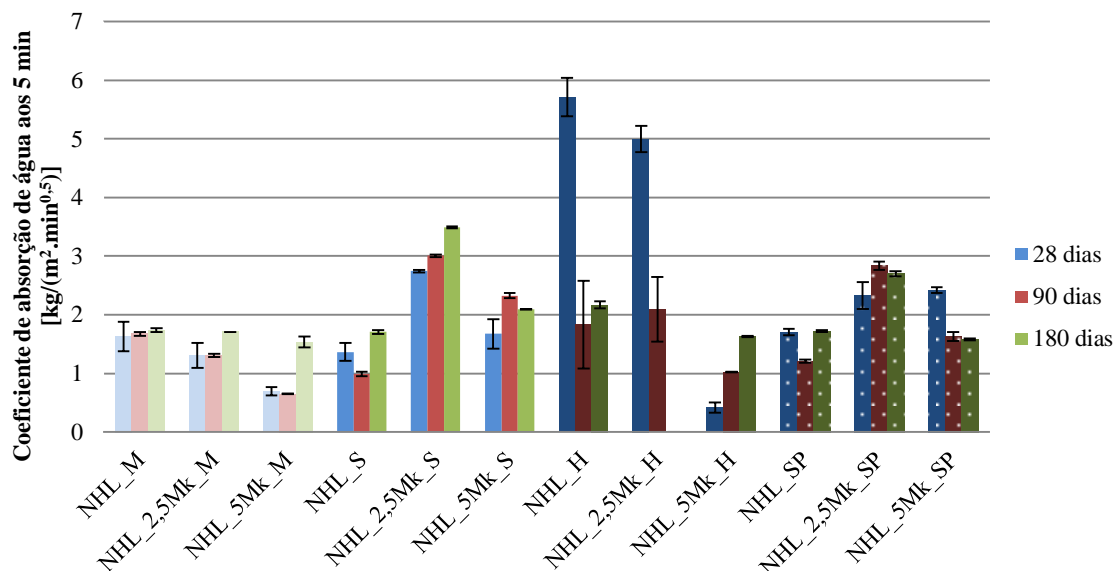


Figura 3.56 – Coeficiente de absorção aos 5 min dos provetes em suporte de tijolo nas curas M, S, H e SP aos 28, 90 e 180 dias

Analisando a Figura 3.56 verifica-se que a argamassa com maior Ca_5 médio foi a argamassa NHL_H aos 28 dias; a argamassa que obteve uma velocidade de absorção de água mais baixa foi a NHL_5Mk_H aos 28 dias. Registou-se uma vasta gama de valores de Ca_5 na ordem de 0,42-5,71 [kg/(m².min^{0,5})], entre todas as argamassas.

Da observação da Figura 3.56, não se verifica nenhuma tendência definida para a evolução com a idade.

De seguida é feita uma análise da influência do teor em Mk na evolução de Ca_5 e uma análise da influência do tipo de cura. Os valores de referência utilizados para a análise da influência do teor em Mk foram os da argamassa sem Mk (NHL); para a análise da influência do tipo de cura são utilizados os valores da cura standard (S).

Influência do teor de metacaulino

De um modo geral, analisando a Figura 3.56, não se verifica nenhuma tendência de variação explícita entre Ca_5 e o aumento do teor em Mk nas argamassas.

Influência da cura

Genericamente observam-se valores mais altos de Ca_5 nas argamassas com cura S e H, excepto nas argamassas com 5% de Mk da cura H. De seguida é feita uma análise da influência do tipo de cura na evolução do Ca_5 em cada idade de ensaio.

28 dias

Aos 28 dias, para a argamassa NHL as curas M e H registaram um valor de Ca_5 superior (significativamente superior na cura H) ao da cura S, enquanto a cura SP apresentou um valor inferior; para a argamassa NHL_2,5Mk a cura M apresentou um valor inferior a S, a cura H um valor substancialmente superior e a cura SP um valor semelhante; para a argamassa NHL_5Mk as curas M e H obtiveram um valor inferior a S e a cura SP um valor superior.

90 dias

Aos 90 dias, para a argamassa NHL as curas M, H e SP apresentaram um valor de Ca_5 superior a S; para a argamassa NHL_2,5Mk as curas M e H registaram um valor inferior e a cura SP um valor semelhante; para a argamassa NHL_5Mk as curas M, H e SP obtiveram um valor inferior.

180 dias

Aos 180 dias, para a argamassa NHL as curas M e SP obtiveram um valor de Ca_5 semelhante ao valor de S e a cura H um valor substancialmente superior; para a argamassa NHL_2,5Mk as curas M, H e SP registaram um valor inferior; para a argamassa NHL_5Mk as curas M e SP apresentaram um valor inferior.

3.5. Rebocos Aplicados na Estação de Exposição Natural de Revestimentos

De modo a avaliar o comportamento das argamassas sob a forma de reboco em exposição natural, e com apoio dos projectos LIMECONTECH e METACAL, foi executada a Estação de Exposição Natural de Revestimentos (EENR) no terreno a Poente adjacente ao DEC no Campus da Caparica da FCT UNL. A criação desta estação teve, neste caso, como principal objectivo possibilitar criar condições para poderem ser aplicadas e acompanhada a evolução de argamassas sob forma de reboco quando sujeitas a ambientes exteriores e num contexto próximo das condições reais de obra. Foram construídos seis muretes de alvenaria (de dimensões 2,5 x 2 m) de um pano de tijolo de 22 cm ao corte (espessura de 20 cm), assentes em sapatas de betão pouco armado. As três argamassas estudadas

nesta dissertação foram posteriormente aplicadas em painéis com dimensões de 0,6 x 2,5 m num desses muretes.

De modo a garantir uma exposição solar idêntica em todos os muretes e a otimizar o espaço do terreno disponibilizado pela FCT UNL, foi feita uma planta do terreno sobre a qual se organizou a disposição dos muretes. Todos eles foram construídos de modo a terem um paramento orientado a Norte e, logo, outro a Sul.

De seguida é feita uma breve descrição do processo de construção da EENR, que foi coordenado pelo Eng.º Vítor Silva.

- Procedeu-se à desmatização do terreno;
- Construíram-se as cofragens destinadas à implementação das sapatas;
- Realizaram-se as marcações das sapatas no terreno de modo a garantir o alinhamento e afastamento das mesmas;
- Procedeu-se ao nivelamento do terreno sobre o qual se colocaram as cofragens (Figura 3.57);
- Com recurso a uma betoneira, fabricou-se o betão utilizado nas sapatas (Figura 3.58);
- Depois de betonadas as sapatas, o betão em estado fresco foi compactado e rasado (Figura 3.59);
- Ao fim de 48h, foram retiradas as cofragens das sapatas (Figura 3.60), e iniciou-se o assentamento das alvenarias (Figura 3.61);
- Finalizados os muretes, estes foram protegidos pela colocação de uma fiada de telhas sobre o topo (Figura 3.62).



Figura 3.57 – Cofragens assentes no terreno nivelado e desmatado



Figura 3.58 – Fabrico do betão utilizado nas sapatas



Figura 3.59 – Betonagem das sapatas



Figura 3.60 – Sapatas em estado endurecido



Figura 3.61 – Assentamento de tijolos



Figura 3.62 – Aspecto final dos muretes

Na Figura 3.63 ilustra-se a implantação do parque de muretes com a indicação do murete utilizado.

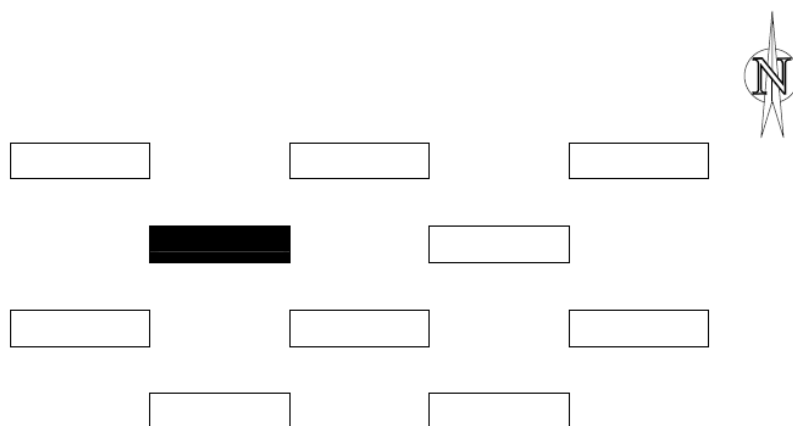


Figura 3.63 – Implantação do parque de muretes; indicação do murete utilizado

Numa segunda fase, foram aplicados os rebocos:

- Colocaram-se ripas de madeira de modo a separar três áreas para posterior aplicação de diferentes argamassas (Figura 3.64);
- Para o fabrico das argamassas, misturaram-se os componentes numa gamela; no caso do fabrico do salpisco, e de modo a obter uma melhor aderência, adicionou-se mais 10% de água comparativamente à quantidade de água pré-definida (Figura 3.65);
- Aplicou-se o salpisco das diferentes argamassas nas três áreas previamente definidas com auxílio de uma colher de pedreiro e de uma talocha (Figura 3.66);
- Ao fim de 24h, repetiu-se o processo de fabrico das argamassas (mas agora com a mesma quantidade de água dos provetes de laboratório) e aplicou-se a segunda e última camada das diferentes argamassas com uma espessura de 2 cm, sendo esta espessura garantida com a fixação de réguas metálicas aos muretes; o acabamento do reboco foi obtido pela passagem repetida da talocha (Figura 3.67).

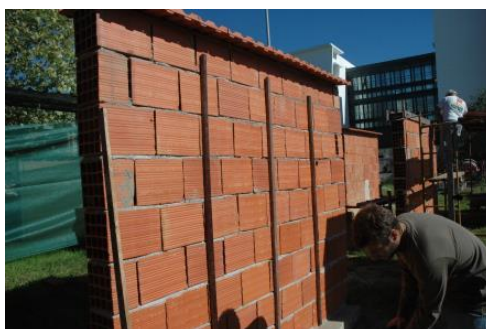


Figura 3.64 – Murete dividido antes da aplicação das argamassas



Figura 3.65 – Fabrico da argamassa



Figura 3.66 – Execução do Salpisco



Figura 3.67 – Aplicação da segunda camada de reboco e acabamento

Relativamente à aplicação das argamassas, importa referir a fraca adesão de todas elas ao suporte. No entanto, verificou-se uma crescente melhoria na aplicabilidade (mesmo que reduzida) com o aumento do teor em metacaulino. Esta dificuldade de aplicação poderá estar relacionada com a granulometria do agregado utilizado, constituído por poucos finos.

Como a execução dos rebocos no murete só decorreu na fase final do trabalho, não foi possível realizar ensaios de caracterização destes rebocos; fez-se apenas uma análise da sua aplicabilidade e uma análise visual dos rebocos 7, 14, e 21 dias depois de aplicados os rebocos (Figura 3.68). Em trabalhos futuros será possível proceder à sua caracterização.

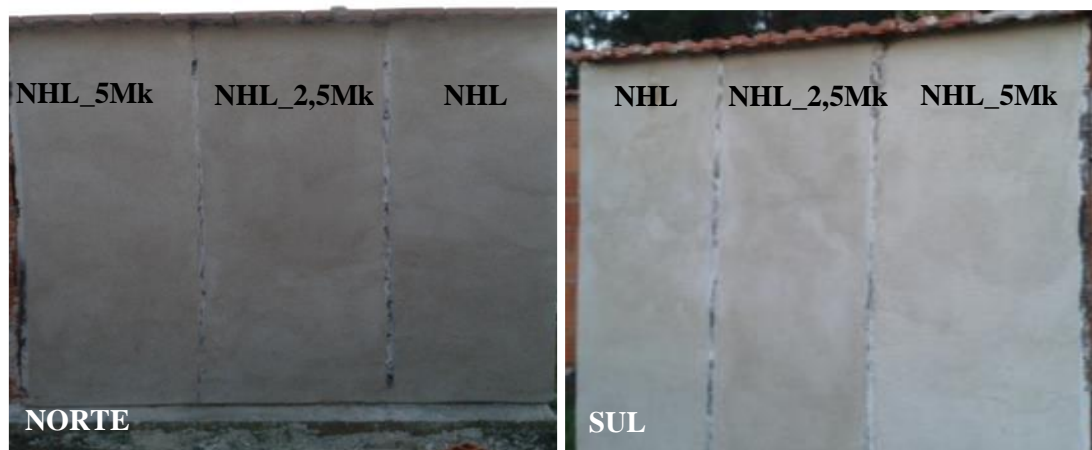


Figura 3.68 – Análise visual dos rebocos sete dias depois de aplicados

A análise visual efectuada teve como objectivo avaliar a cor, aspecto, friabilidade e a existência de fendilhação. Relativamente à cor, todos os rebocos apresentam uma cor cinza claro, embora os rebocos sem metacaulino (NHL) apresentem uma cor ligeiramente mais escura que os restantes. À superfície, todos os rebocos apresentam um aspecto regular, consideravelmente friável e com uma grande quantidade de agregados grosseiros visíveis. Esta questão superficial poderia vir a ser corrigida pela aplicação de uma camada de acabamento do reboco. Não ocorreu qualquer fendilhação visível de retracção e até à data da última análise visual (21 dias depois da aplicação), não se detectou qualquer tipo de anomalia.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo alguns resultados obtidos na campanha experimental serão relacionados entre si, e comparados com os resultados obtidos por outros autores.

Nos Quadro 4.1, Quadro 4.2 e Quadro 4.3 encontra-se uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios realizados às argamassas em estado fresco, provetes prismáticos e provetes em suporte de tijolo, respectivamente.

Quadro 4.1 – Síntese de resultados dos ensaios realizados às argamassas em estado fresco

Ensaio	Média e DP	Argamassas em estado fresco		
		NHL	NHL_2,5Mk	NHL_5Mk
Consistência por espalhamento [mm]	Média	170,1	165,4	163,6
	DP	5,9	3,3	3,6
Retenção de água [%]	Média	72,3	71,4	72,2
	DP	0,2	0,2	0,3
Massa Volúmica no estado fresco [kg/m ³]	Média	2022	2160	3115
	DP	-	-	-
Teor em ar [%]	Média	2,4	3,0	3,8
	DP	-	-	-

Quadro 4.2 – Síntese de resultados dos ensaios realizados aos provetes prismáticos

Ensaio	Média e DP	Argamassas em estado endurecido (provetes prismáticos)								
		NHL_M	NHL_2,5 Mk_M	NHL_5 Mk_M	NHL_S	NHL_2,5 Mk_S	NHL_5 Mk_S	NHL_H	NHL_2,5 Mk_H	NHL_5 Mk_H
Ed [MPa]	28d	3110	2636	2731	2625	2023	1926	3715	3938	3675
	DP	125	30	444	174	317	399	85	870	947
	90d	4778	3952	3602	2524	2367	1766	4753	5100	4071
	DP	32	570	472	51	87	88	166	154	289
	180d	4461	3495	2843	2481	2145	1735	4096	3728	2938
	DP	43	224	371	172	576	131	197	342	226
Rt [MPa]	28d	0,47	0,33	0,37	0,32	0,23	0,26	0,51	0,47	0,51
	DP	0,02	0,03	0,03	0,04	0,06	0,06	0,07	0,10	0,10
	90d	0,73	0,53	0,50	0,67	0,67	0,44	0,24	0,29	0,26
	DP	0,05	0,08	0,06	0,06	0,06	0,08	0,04	0,02	0,02
	180d	0,49	0,39	0,71	0,22	0,24	0,68	0,48	0,39	0,25
	DP	0,01	0,11	0,06	0,02	0,03	0,09	0,10	0,03	0,06
Rc [MPa]	28d	0,81	1,51	1,44	0,61	1,00	1,27	0,90	1,24	1,69
	DP	0,05	0,28	0,14	0,07	0,13	0,02	0,14	0,09	0,08
	90d	1,07	0,93	1,62	0,55	0,84	0,80	1,34	1,46	1,20
	DP	0,07	0,08	0,14	0,04	0,26	0,32	0,08	0,19	0,16
	180d	0,81	1,36	0,96	0,49	0,78	1,00	1,35	1,48	0,97
	DP	0,10	0,13	0,18	0,05	0,03	0,20	0,35	0,14	0,39
CC [kg/(m ² .min ^{0,5})]	28d	2,72	2,45	3,38	3,40	3,85	3,52	3,09	3,15	3,14
	DP	0,26	0,39	0,20	0,30	0,08	0,05	0,06	0,26	0,16
	90d	3,07	3,16	3,17	3,33	3,51	3,59	2,59	2,25	2,38
	DP	0,14	0,17	0,11	0,11	0,07	0,17	0,07	0,03	0,13
	180d	2,78	3,53	3,40	3,56	3,51	3,57	2,54	2,85	3,09
	DP	0,41	0,10	0,06	0,15	0,05	0,07	0,33	0,09	0,18
VA [kg/m ²]	28d	21,07	24,76	22,28	21,30	22,38	21,37	21,64	25,08	22,45
	DP	0,48	1,66	0,34	1,73	0,66	1,19	0,50	1,27	0,77
	90d	19,06	21,48	21,82	18,93	20,04	20,76	22,28	19,16	19,24
	DP	1,01	0,70	0,68	1,03	0,36	1,12	0,61	0,59	0,78
	180d	18,23	22,02	22,05	21,60	20,58	21,37	21,21	18,98	21,68
	DP	3,44	0,22	0,59	0,86	0,78	0,26	0,68	1,52	1,87
TS [kg/(m ² .h)]	28d	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,10	0,09	0,09	0,11
	DP	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	90d	0,09	0,10	0,10	0,14	0,14	0,12	0,10	0,13	0,12
	DP	0,01	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00
	180d	0,09	0,10	0,11	0,12	0,16	0,13	0,11	0,13	0,12
	DP	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
IS [-]	28d	0,31	0,33	0,30	0,31	0,30	0,26	0,29	0,33	0,30
	DP	0,02	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
	90d	0,24	0,26	0,24	0,14	0,15	0,18	0,24	0,18	0,19
	DP	0,03	0,04	0,04	0,00	0,01	0,05	0,02	0,02	0,01
	180d	0,25	0,26	0,24	0,18	0,14	0,19	0,18	0,19	0,25
	DP	0,02	0,04	0,03	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01	0,06

Ensaio	Média e DP	Argamassas em estado endurecido (provetes prismáticos)								
		NHL_M	NHL_2, 5Mk_M	NHL_5Mk_M	NHL_S	NHL_2, 5Mk_S	NHL_5 Mk_S	NHL_H	NHL_2, 5Mk_H	NHL_5 Mk_H
λ [W/ (m.K)]	28d	0,763	0,785	0,776	0,742	0,680	0,708	0,771	0,812	0,776
	DP	0,02	0,04	0,04	0,05	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03
	90d	0,933	0,875	0,890	0,696	0,819	0,869	0,878	0,824	0,786
	DP	0,06	0,02	0,05	0,06	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
	180d	0,802	0,786	0,824	0,754	0,812	0,691	0,905	0,777	0,744
	DP	0,13	0,04	0,06	0,04	0,05	0,11	0,14	0,05	0,03
Perda de massa [%] 14º ciclo	28d	16	100	93	64	100	100	58	84	82
	90d	0	24	0	0	0	1	100	100	100
	180d	54	17	23	15	27	20	14	12	23
Sulfatos retidos [%] 1º ciclo	90d	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5
	180d	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
Pab [%]	28d	25,0	26,8	26,7	24,6	23,4	25,7	25,4	26,1	25,1
	DP	0,3	0,7	1,0	0,5	0,0	0,3	0,0	0,5	0,4
	90d	24,4	26,9	26,4	23,4	25,4	25,8	25,9	26,2	25,9
	DP	0,4	0,3	0,7	1,5	0,4	0,3	0,6	0,2	0,7
	180d	24,6	26,0	26,9	23,6	23,6	25,4	25,3	25,5	27,2
	DP	0,4	0,4	0,9	0,4	2,2	0,8	0,5	0,6	0,0
MV [kg/m³]	28d	1868	1828	1817	1869	1834	1834	1861	1834	1858
	DP	13	5	20	7	1	12	2	11	8
	90d	1903	1853	1847	1903	1874	1864	1860	1832	1840
	DP	11	5	22	16	12	13	3	9	9
	180d	1886	1861	1828	1895	1883	1851	1891	1872	1840
	DP	9	6	18	3	12	15	2	9	7

Quadro 4.3 – Síntese de resultados dos ensaios realizados aos provetes em suporte de tijolo

Ensaio	Média e DP	NHL_M	NHL_2,5 Mk_M	NHL_5Mk_M	NHL_S	NHL_2,5 Mk_S	NHL_5Mk_S	NHL_H	NHL_2,5 Mk_H	NHL_5Mk_H	NHL_SP	NHL_2,5 Mk_SP	NHL_5Mk_SP
λ [W/(m.K)]	28 dias	0,932	0,457	0,573	0,783	0,647	0,943	1,004	0,698	1,090	0,649	0,854	0,802
	DP	0,088	0,065	0,086	0,083	0,067	0,062	0,065	0,134	0,070	0,078	0,086	0,064
	90 dias	0,924	0,767	0,731	0,873	0,620	0,911	0,988	0,724	0,931	0,860	0,853	0,745
	DP	0,087	0,123	0,118	0,122	0,102	0,036	0,070	0,115	0,067	0,097	0,031	0,085
	180 dias	0,946	0,723	0,873	0,864	0,718	0,976	1,011	0,803	0,879	0,997	0,894	0,840
	DP	0,119	0,055	0,093	0,114	0,086	0,051	0,066	0,064	0,092	0,062	0,060	0,070
v_{prop} [m/s]	28 dias	1456	1647	1515	1265	1185	1245	1161	1301	1301	1243	1280	1164
	DP	111	139	184	143	91	77	174	93	93	55	88	73
	90 dias	1631	1508	1410	1365	1133	1260	1231	1349	1349	1289	1366	1253
	DP	99	91	72	67	75	58	61	71	71	68	68	143
	180 dias	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	DP	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca 60 m [kg/(m ² .min ^{0,5})]	28 dias	3,7	1,4	1,0	2,7	5,3	2,2	4,8	3,6	0,6	3,0	3,4	3,7
	DP	0,2	0,2	0,1	0,4	0,1	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4
	90 dias	2,0	1,2	1,2	2,0	5,6	3,4	2,8	2,5	1,8	2,3	5,7	3,2
	DP	0,3	0,2	0,0	0,3	0,2	0,3	0,4	0,2	0,0	0,2	0,5	0,6
	180 dias	1,9	1,7	2,0	2,7	6,9	2,8	3,6	-	3,3	3,3	4,8	3,5
	DP	0,3	0,0	0,7	0,3	0,1	0,1	0,4	-	0,1	0,1	0,3	0,1
Ca 5 m [kg/(m ² .min ^{0,5})]	28 dias	1,63	1,30	0,70	1,37	0,42	1,71	4,77	3,56	0,42	1,71	2,33	2,42
	DP	0,5	0,4	0,1	0,3	0,0	0,5	0,7	0,4	0,2	0,1	0,5	0,1
	90 dias	1,68	1,30	0,65	0,99	3,01	2,33	1,83	2,09	1,02	1,21	2,84	1,63
	DP	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	1,5	1,1	0,0	0,1	0,1	0,2
	180 dias	1,74	1,71	1,54	1,71	3,49	2,09	2,17	-	1,63	1,72	2,70	1,58
	DP	0,1	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,1	-	0,0	0,0	0,1	0,0

Ensaio	Média e DP	NHL_M	NHL_2,5 Mk_M	NHL_5Mk_M	NHL_S	NHL_2,5 Mk_S	NHL_5Mk_S	NHL_H	NHL_2,5 Mk_H	NHL_5Mk_H	NHL_SP	NHL_2,5 Mk_SP	NHL_5Mk_SP
Ca 4 ml [kg/(m ² .min ^{0,5})]	28 dias	2,23	1,37	3,14	1,94	2,64	1,69	6,72	5,31	-	2,21	2,37	2,63
	DP	0,16	0,28	-	0,14	0,19	0,36	0,33	0,40	-	0,02	0,04	-
	90 dias	2,14	1,28	1,53	1,72	3,24	2,54	1,57	2,39	1,49	1,70	2,93	2,30
	DP	0,20	0,04	1,03	0,03	0,08	0,21	0,29	0,07	0,07	0,07	0,17	0,44
	180 dias	1,45	1,50	1,90	1,83	3,36	2,25	2,31	-	2,16	2,19	3,12	2,11
	DP	0,08	0,05	0,67	0,13	0,03	0,28	0,27	-	0,09	0,21	0,30	0,06

4.1. Estado Fresco

A Figura 4.1 relaciona os resultados do ensaio de espalhamento com os resultados do ensaio da massa volúmica. Em linha com os resultados de estudos de outros autores, a tendência do ensaio de espalhamento é inversa ao da massa volúmica, ou seja, um aumento da massa volúmica traduz-se numa diminuição do espalhamento.

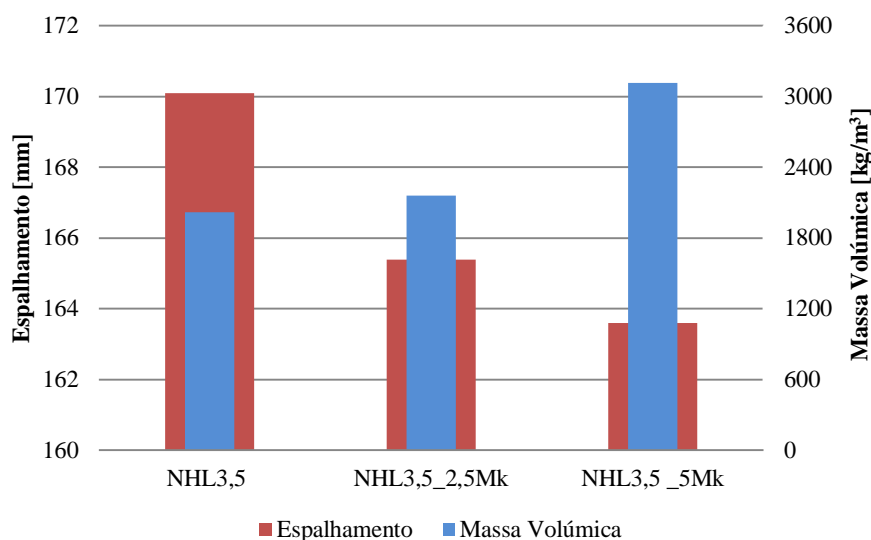


Figura 4.1 – Comparação entre espalhamento e massa volúmica

Na Figura 4.2 apresenta-se um cruzamento entre os resultados do ensaio de espalhamento e os do ensaio de teor em ar. Através da figura, verifica-se que o teor em ar aumenta com o aumento do teor em metacaulino, enquanto o espalhamento tende a diminuir.

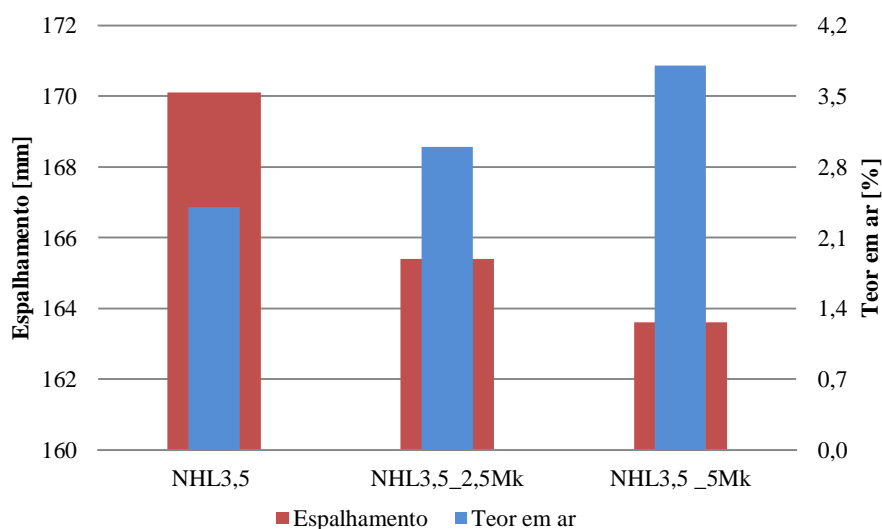


Figura 4.2 – Comparação entre espalhamento e teor em ar

4.2. Resistências Mecânicas

Na Figura 4.3 encontram-se as evoluções dos parâmetros E_d , R_t e R_c de todas as argamassas e a todas as idades.

Verifica-se que os parâmetros E_d e R_t têm tendências semelhantes, ou seja, de um modo geral, as argamassas com metacaulino apresentam menores valores de E_d e R_t quando comparadas com as argamassas sem metacaulino. No entanto, a resistência à compressão segue uma tendência inversa, registando-se um acréscimo de R_c nas argamassas com metacaulino. Esta última tendência está de acordo com resultados de estudos anteriores, uma vez que estes sugerem um aumento das resistências mecânicas com o aumento do teor de metacaulino (FARIA et al., 2012; VEIGA et al., 2009). A divergência nos resultados referidos pode ser hipoteticamente explicada pelo facto dos ensaios de módulo de elasticidade e de resistência à tracção serem mais sensíveis à presença de microfissuras do que o ensaio de resistência à compressão. De modo a compreender esta discrepância, sugere-se que em trabalhos futuros seja utilizado um maior número de provetes para comprovar estas tendências.

Como seria expectável, a exposição das argamassas a condições de cura H contribui para um aumento das propriedades mecânicas na generalidade das argamassas. Devido a uma humidade elevada neste tipo de cura, formam-se possivelmente mais compostos hidratados, que são responsáveis pelo aumento das resistências mecânicas. Já as argamassas da cura S apresentam menores características mecânicas, o que poderá ser explicado pelo predomínio da reacção de carbonatação sobre a reacção de hidratação (GRILO et al., aceite para publicação; EL-TURKI et al., 2007).

Em relação à idade, verifica-se, na generalidade das argamassas sujeitas às curas M e H com metacaulino, um aumento das resistências mecânicas até aos 90 dias, atingindo-se nesta idade as maiores resistências. De um modo geral, dos 90 para os 180 dias, as resistências tendem a diminuir, atingindo em alguns casos valores semelhantes (ou mesmo inferiores) aos obtidos aos 28 dias. Segundo Gameiro e Grilo (GAMEIRO et al., 2013; GRILO et al., aceite para publicação), esta redução das resistências mecânicas dos 90 para 180 dias poderá estar relacionada com a instabilidade dos compostos hidratados formados na reacção pozolânica do hidróxido de cálcio das cais com o metacaulino. De um modo geral, as argamassas da cura S não sofreram grandes alterações com a idade.

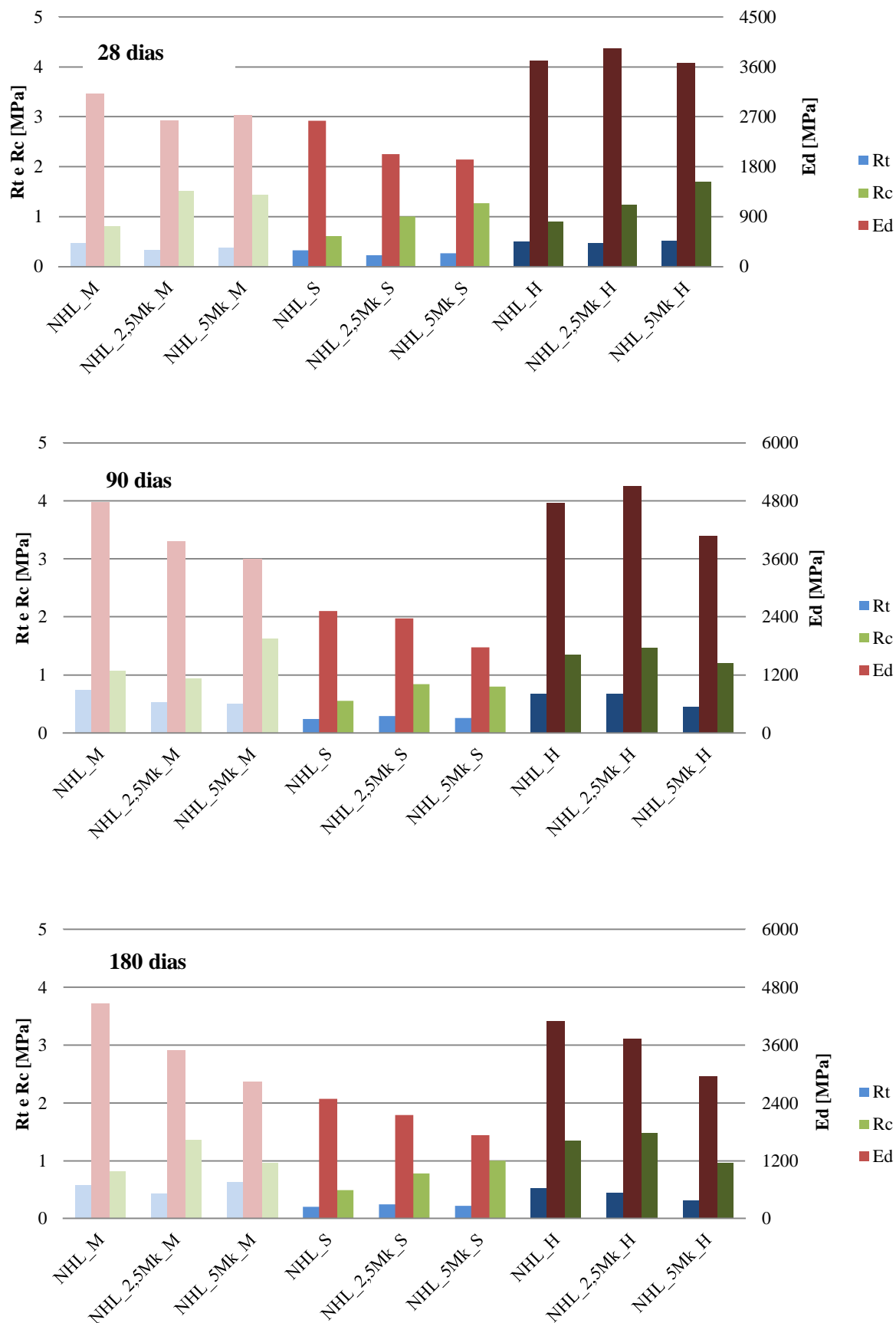


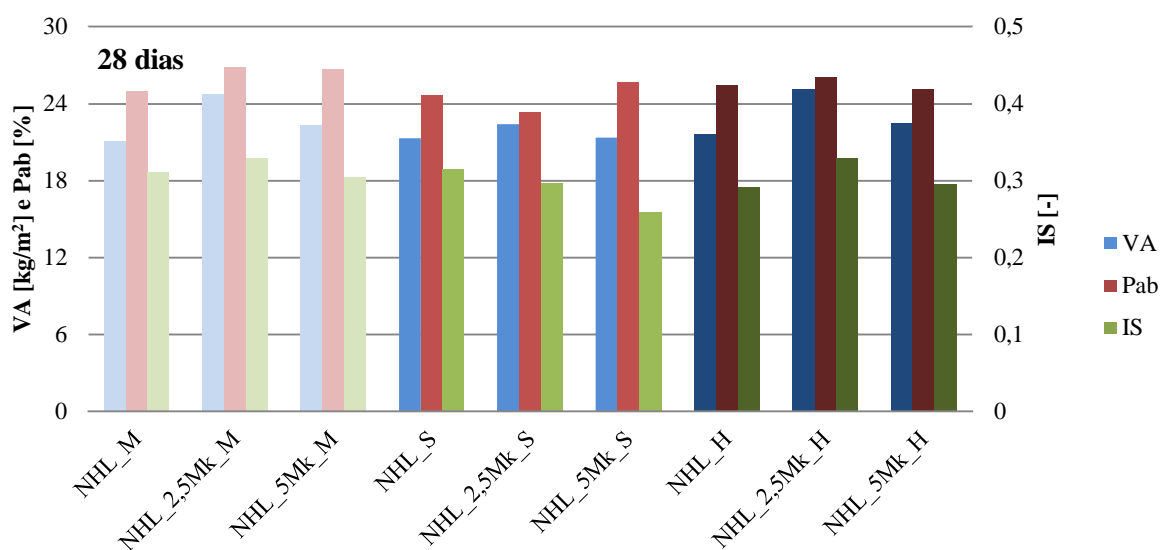
Figura 4.3 – Módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção e à compressão a cada idade e nas curas M, S e H

4.3. Comportamento à Acção da Água

Provetes Prismáticos

O comportamento das argamassas face à acção da água foi estudado através do ensaio de absorção de água por capilaridade (através dos parâmetros CC e VA) e do ensaio de secagem (através dos parâmetros TS e IS). De um modo geral, pretende-se que as argamassas absorvam água o mais lentamente possível (baixo CC), na menor quantidade (baixo VA), que a secagem inicial se dê de forma rápida (elevado TS) e que o período de tempo total de secagem seja o mais reduzido (baixo IS).

Na Figura 4.4 são apresentados os valores do índice de secagem, valor assintótico e da porosidade aberta. Relacionando o IS com o VA observa-se que a tendência é, na maioria dos casos, semelhante, ou seja, as argamassas com maior capacidade de absorção de água apresentam maior dificuldade de secagem total e vice-versa, embora as variações registadas sejam muito reduzidas. Estas variações podem ser explicadas pela porosidade aberta, uma vez que uma maior porosidade aberta pode resultar numa maior absorção total de água, e pela dimensão dos poros (embora não tenha sido feito esta caracterização) uma vez que a sua porosimetria influencia a forma como a água é absorvida e é libertada depois, na forma de vapor.



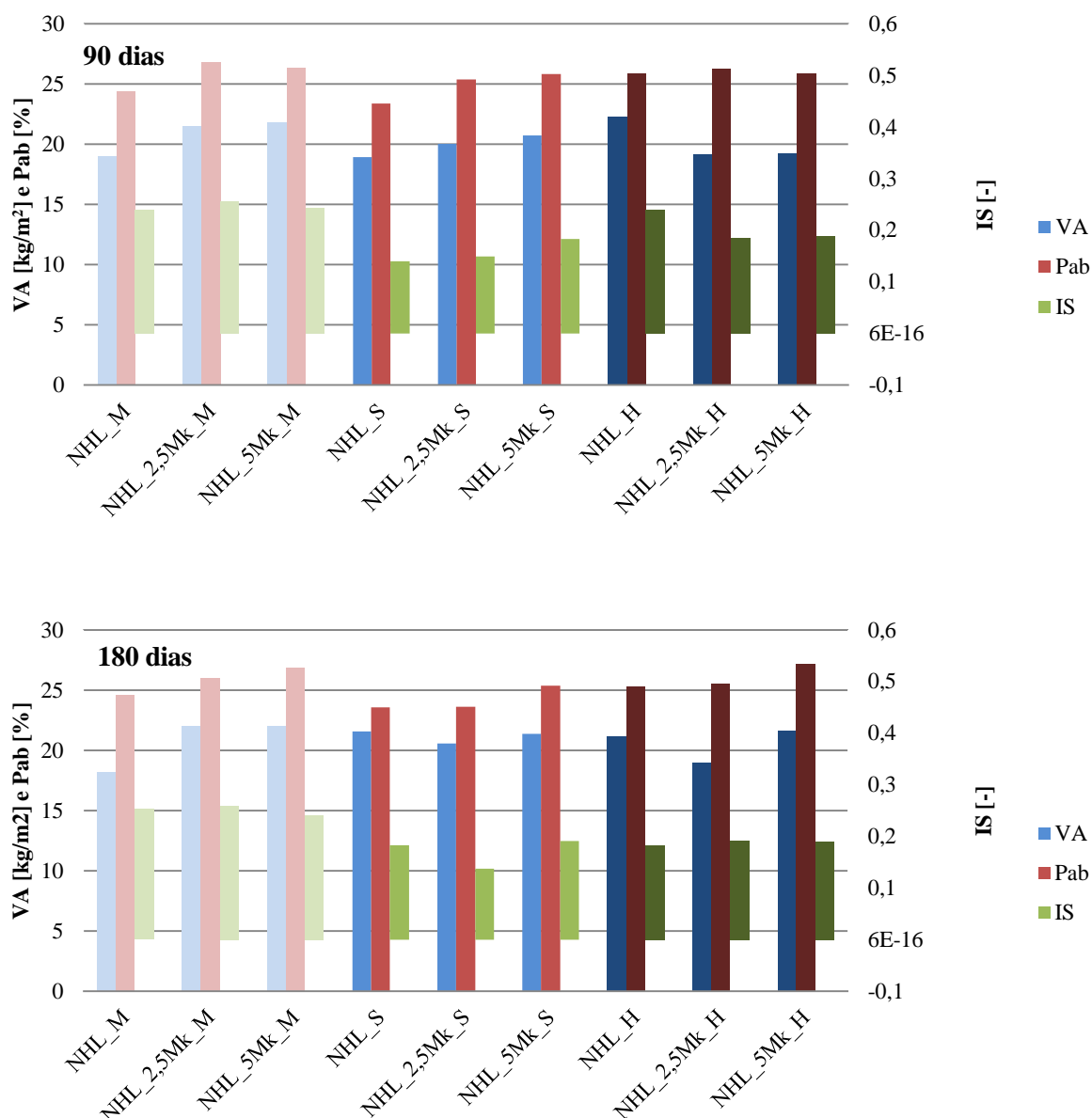


Figura 4.4 – Valor assintótico, porosidade aberta e índice de secagem a cada idade e nas curas M,S e H

De modo a avaliar conjuntamente o comportamento das argamassas face à absorção e à secagem de água utiliza-se o parâmetro AB (*Aqua Behaviour*) (GRILO, 2013) que relaciona as primeiras horas de secagem TS, com os primeiros minutos de absorção de água por capilaridade, CC, já antes apresentado no capítulo 2.

Através da Figura 4.5 é possível verificar que as argamassas que obtiveram melhores resultados foram as sujeitas à cura H, destacando-se pela positiva a argamassa NHL_2,5Mk_H que apresenta o maior valor absoluto de AB. De um modo geral, verifica-se uma melhoria do comportamento face à água em todas as argamassas com a idade.

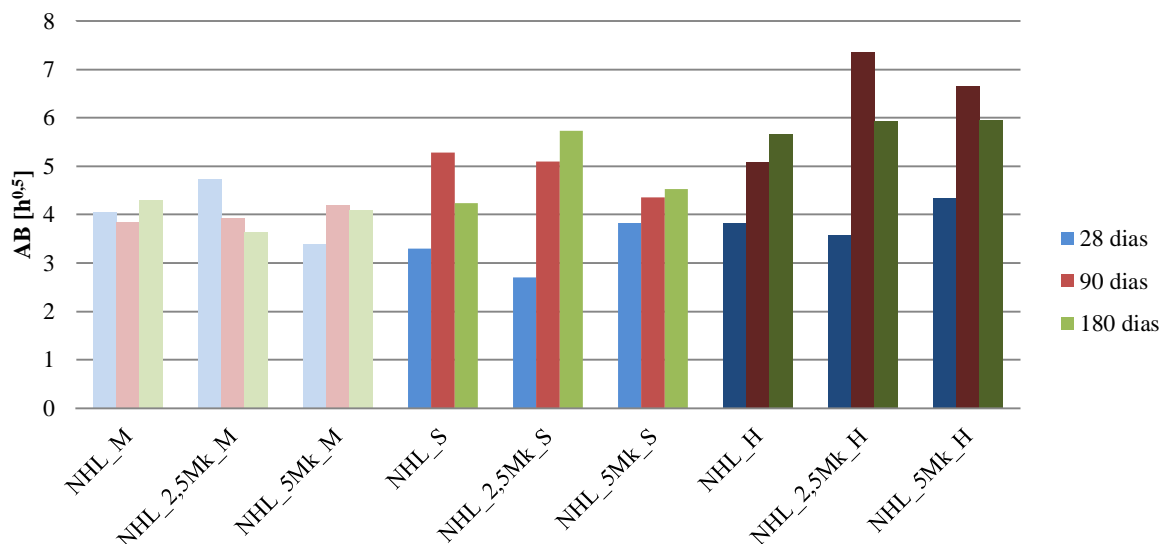
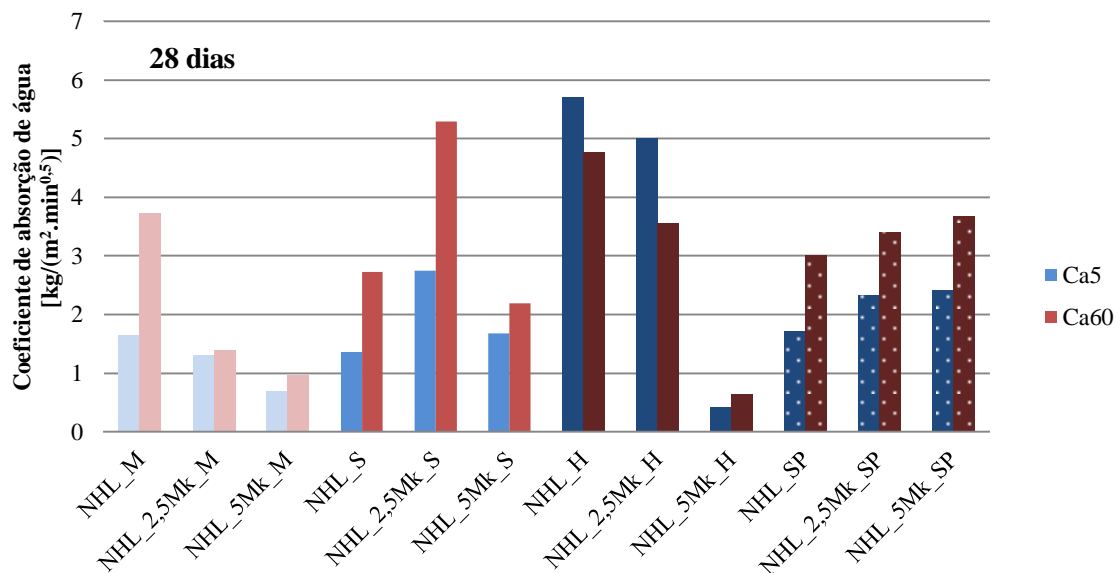


Figura 4.5 – Parâmetro AB em todas as idades e nas curas M,S e H

Provetes de Argamassas sobre Suporte de Tijolo

A Figura 4.6 relaciona o coeficiente de absorção de água aos 60 minutos (Ca_{60}) e aos 5 minutos (Ca_5) de provetes de argamassas sobre suporte de tijolo. De um modo geral, verifica-se uma tendência semelhante entre os dois parâmetros. Um aumento do Ca_{60} traduz-se num aumento do Ca_5 .



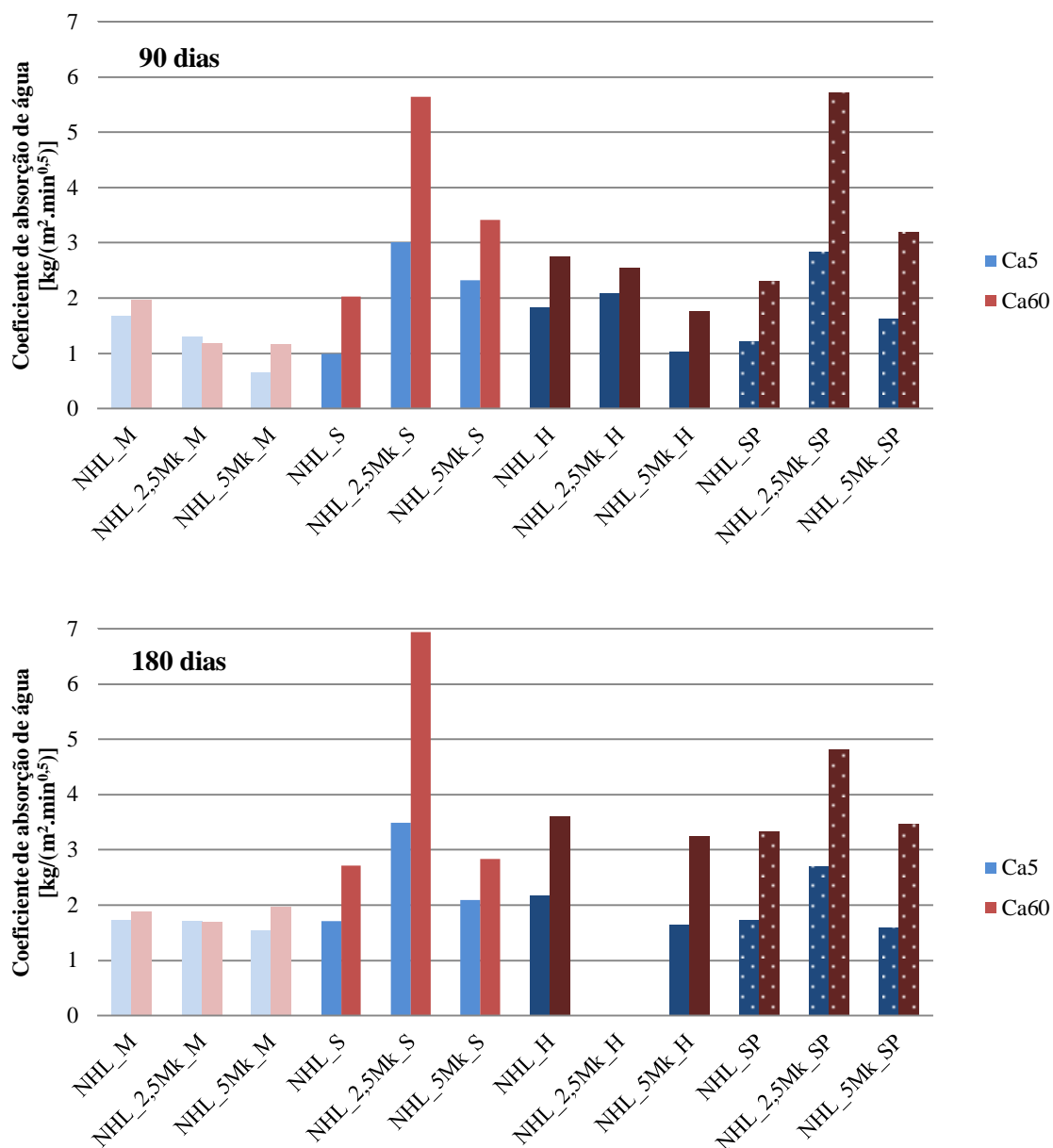


Figura 4.6 – Coeficiente de absorção aos 5 minutos e aos 60 minutos a cada idade, nas curas M, S, H e SP

4.4. Resistência à Tracção por Flexão e ao Ataque dos Sulfatos

Na Figura 4.7 e na Figura 4.8 são apresentados gráficos que comparam a perda de massa resultante do ensaio de ataque de sulfatos, com a percentagem mássica de sais retida após a primeira imersão na solução de sulfatos. Da análise das figuras não se verifica qualquer relação entre a quantidade de sais inicialmente retida e perda de massa total (ao fim de 20 ciclos), ou seja, uma maior retenção inicial de sais não significa um pior comportamento das argamassas face ao ataque dos sulfatos.

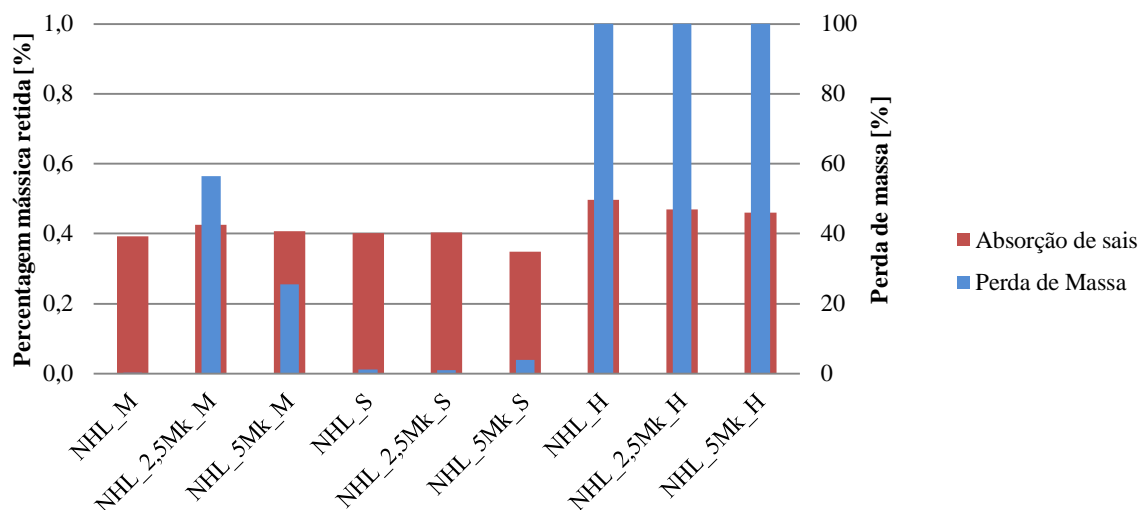


Figura 4.7 – Comparação entre perda de massa e retenção de sais aos 90 dias, nas curas M, S e H

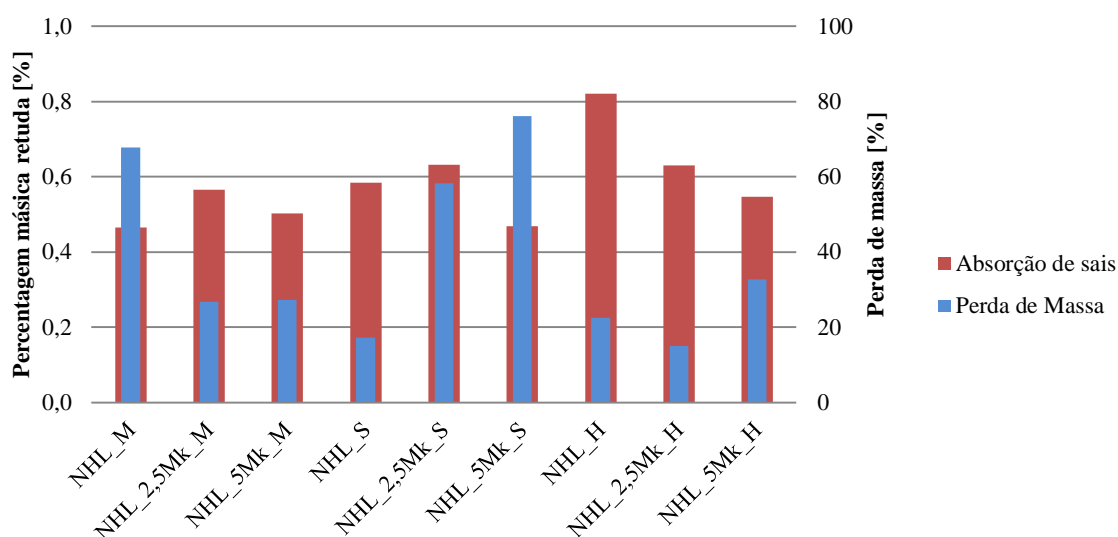


Figura 4.8 - Comparação entre perda de massa e retenção de sais aos 180 dias, nas curas M, S e H

Na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 encontra-se uma comparação entre a resistência à flexão e a resistência ao ataque dos sulfatos aos 28, 90 e 180 dias. Esta comparação é feita relacionando a resistência à flexão e a perda de massa ao fim de 14 ciclos.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de resistência à tracção e da resistência aos sulfatos, verifica-se que, de modo geral, aos 28 e 90 dias as argamassas com maiores resistências à tracção apresentam melhores resistências aos sulfatos.

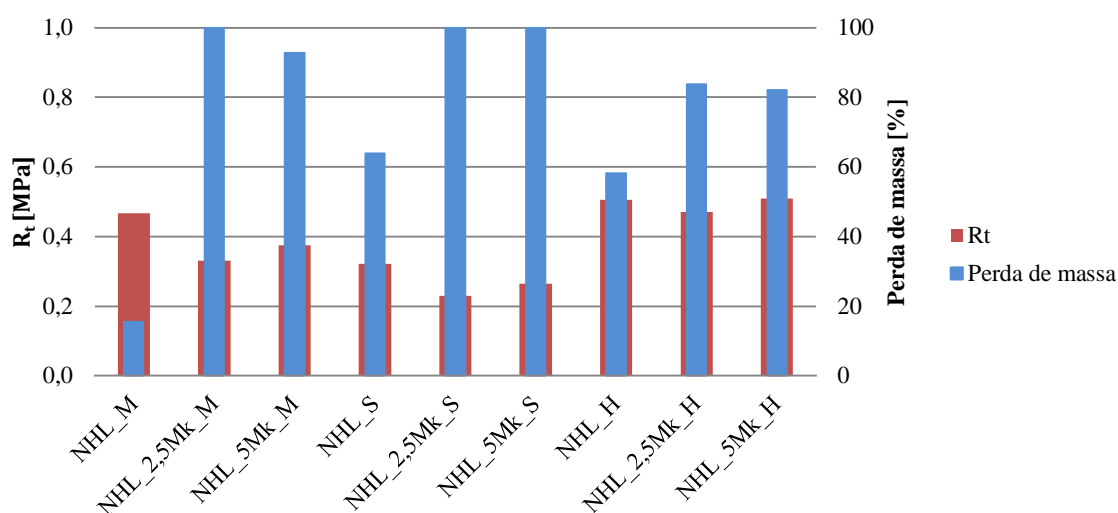


Figura 4.9 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 28 dias, nas curas M,S e H

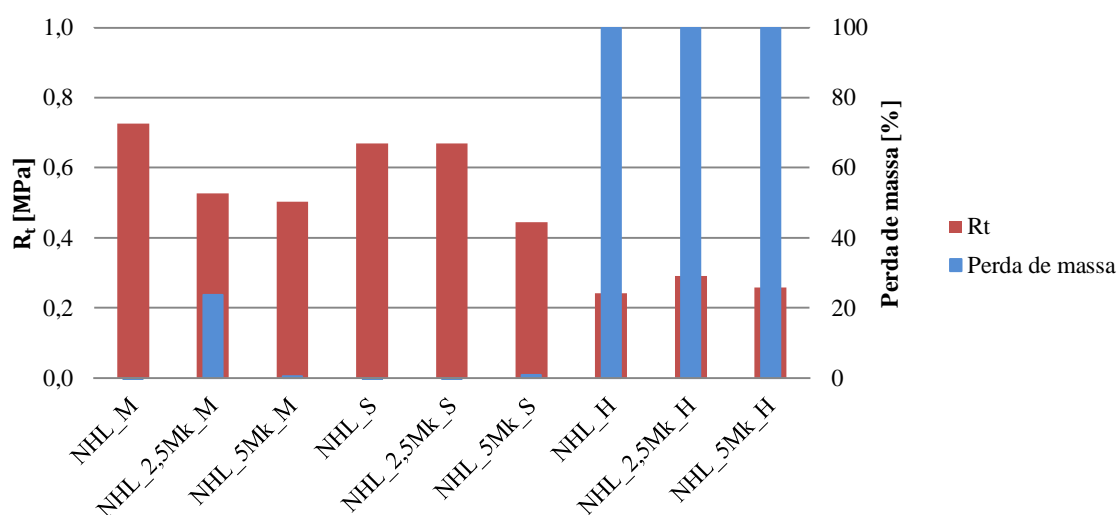


Figura 4.10 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 90 dias, nas curas M, S e H

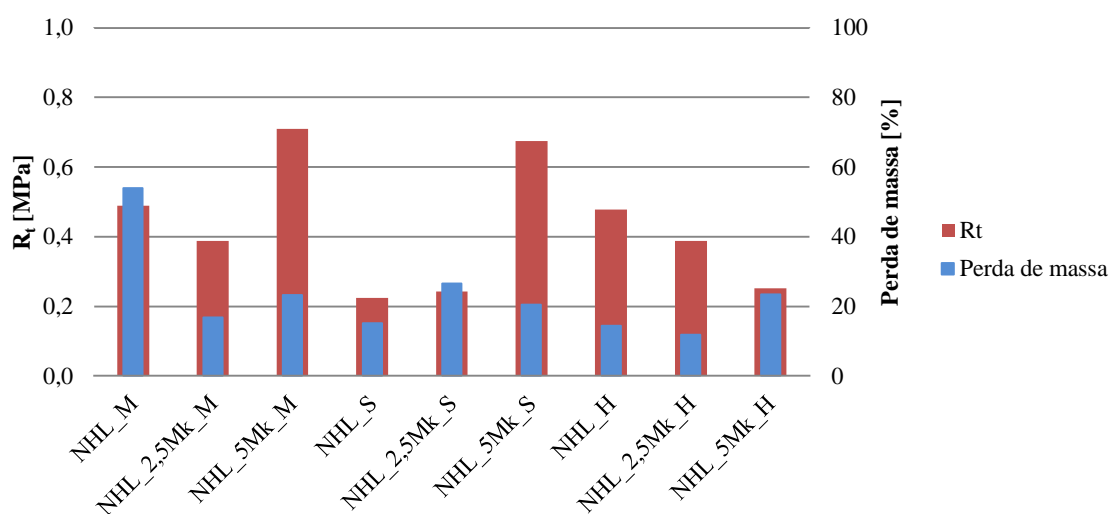


Figura 4.11 – Resistência à tracção por flexão e ao ataque aos sulfatos aos 180 dias, nas curas M, S e H

H

4.5. Condutibilidade Térmica

Tendo em conta que a compactidade de um material pode ser estimada através do ensaio de ultra-sons e que, a condutibilidade térmica também depende desta propriedade em argamassas deste tipo, torna-se interessante comparar os valores obtidos do ensaio de ultra-sons com os valores do ensaio da condutibilidade térmica de provetes em suporte de tijolo (Figura 4.12 e Figura 4.13).

Embora nem sempre se observe uma relação definida entre os dois parâmetros, em alguns casos é possível verificar (especialmente realizando uma análise cura a cura), que a maiores velocidades estão associados a maiores valores de condutibilidade térmica, e vice-versa. Esta tendência é explicada pelo facto de tanto uma maior velocidade de propagação de ultra-sons, como maiores condutibilidades térmicas numa argamassa implicarem uma maior compactidade desta mesma (menos vazios).

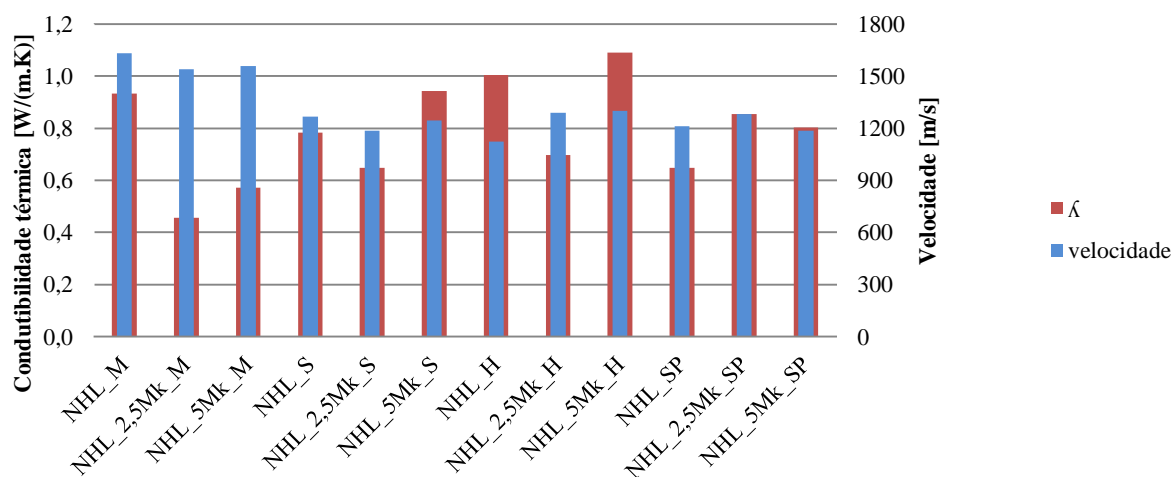


Figura 4.12 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons em provetes sobre tijolo aos 28 dias nas curas M, S, H e SP

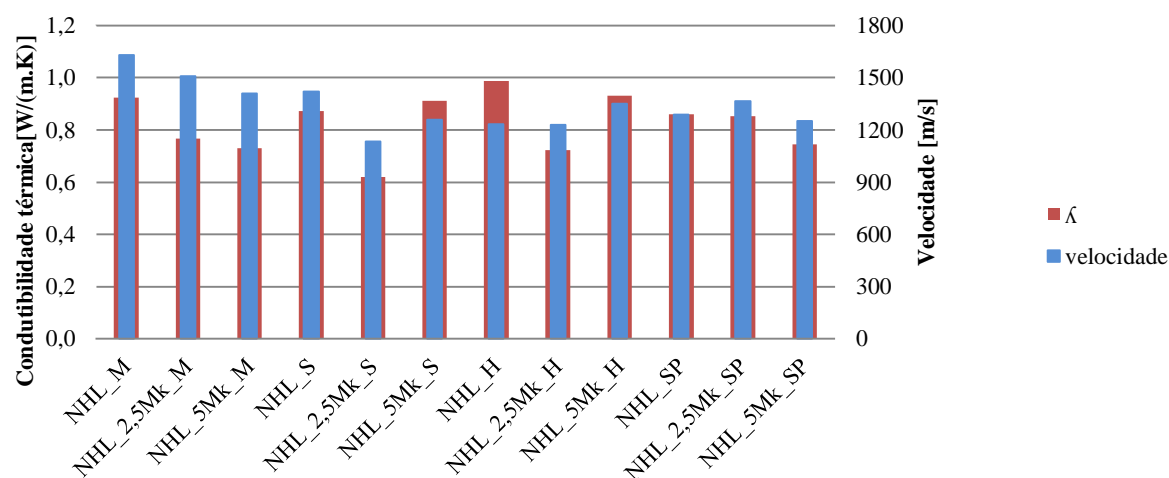


Figura 4.13 – Condutibilidade térmica e velocidade de propagação de ultra-sons em provetes sobre tijolo aos 90 dias nas curas M, S, H e SP

Nas Figura 4.14, Figura 4.15 e Figura 4.16 é possível avaliar os valores da condutibilidade térmica (λ) dos provetes em forma de prisma e dos provetes sobre tijolo.

Analisando as figuras é possível concluir que, em termos qualitativos, a condutibilidade térmica dos provetes prismáticos assemelha-se à dos provetes sobre tijolo. Em certos casos, a evolução não é linear, o que pode ser explicado pelo facto dos provetes prismáticos não possuírem largura suficiente para a sonda ou pelas superfícies dos dois tipos de provetes serem diferentes (ver 3.4.1.6). Outra possível razão é a espessura do reboco aplicado nos tijolos não ser de 2 cm, de acordo com as indicações do manual do aparelho.

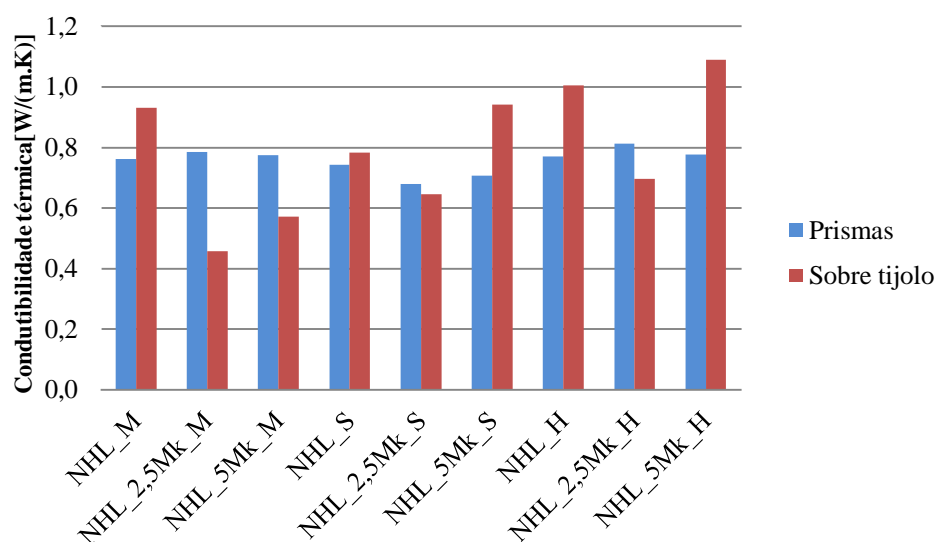


Figura 4.14 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes sobre tijolo aos 28 dias nas curas M, S e H

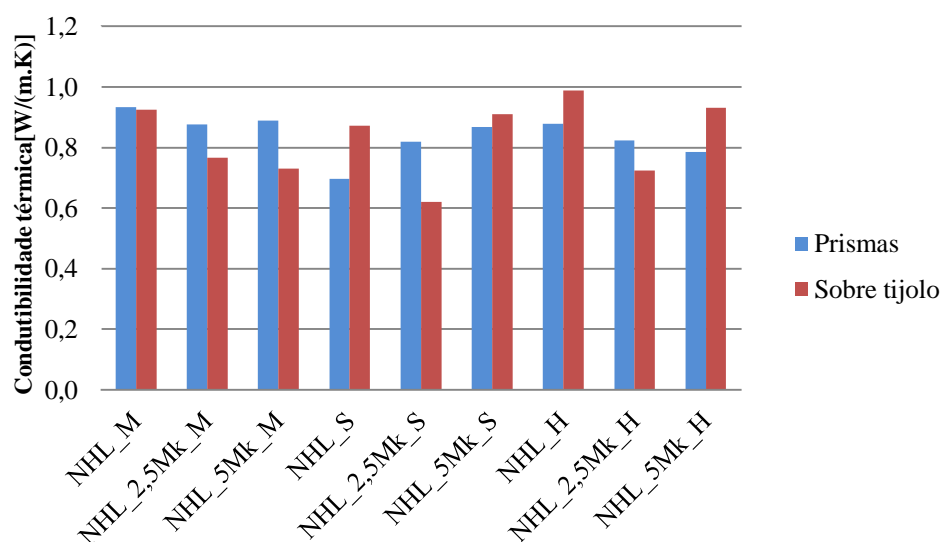


Figura 4.15 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes sobre tijolo aos 90 dias nas curas M, S e H

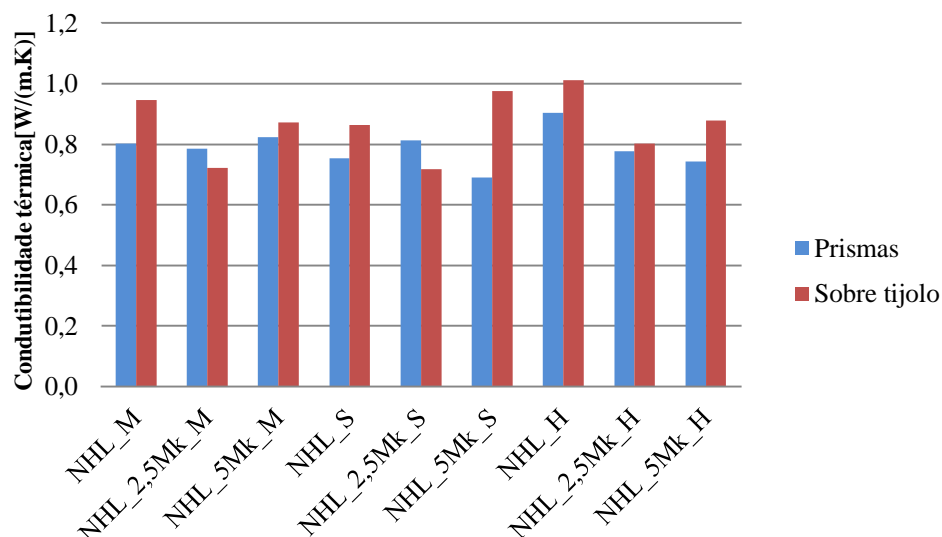


Figura 4.16 – Condutibilidade térmica provetes prismáticos e provetes sobre tijolo aos 180 dias nas curas M, S e H

4.6. Classificação Segundo a Norma EN 998-1 e a gama para edifícios antigos

Muito embora, e tal como foi referido, a mistura de areias utilizada não tivesse sido escolhida no sentido de otimizar as características e não propiciasse boa aplicabilidade, no Quadro 4.4 apresentam-se as classificações das argamassas caracterizadas neste trabalho segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010).

Quadro 4.4 – Classificação das argamassas segundo a norma EN 998-1 (CEN, 2010)

Argamassas	Rc [MPa]		Coeficiente de Capilaridade [(kg/m ² .min ^{1/2})]	
	28d	Categoria	28d	Categoria
NHL_M	0,8	CS I	2,7	W 0
NHL_2,5Mk_M	1,5	CS II	2,4	W 0
NHL_5Mk_M	1,4	CS I	3,4	W 0
NHL_S	0,6	CS I	3,4	W 0
NHL_2,5Mk_S	1,0	CS I	3,8	W 0
NHL_5Mk_S	1,3	CS I	3,5	W 0
NHL_H	0,9	CS I	3,1	W 0
NHL_2,5Mk_H	1,2	CS I	3,2	W 0
NHL_5Mk_H	1,7	CS II	3,1	W 0

Apenas duas argamassas são classificadas na classe CS II mas todas as restantes são pelo menos classificadas como CS I. Tal como seria expectável, todas pertencem à classe mínima relativamente à capilaridade, uma vez que, para além da escolha da areia, não possuem adjuvantes.

No Quadro 4.5 apresenta-se uma comparação dos resultados de alguns parâmetros obtidos no presente trabalho com os intervalos apresentados no

Quadro 2.2 (ver 2.2.1), que definem uma gama de valores a 90 dias de argamassas para edifícios antigos.

Relativamente às resistências mecânicas, a grande maioria das argamassas sujeitas às curas M e H encontra-se dentro da gama de valores definida por Veiga (VEIGA et al., 2002), tanto para rebocos exteriores e interiores, como para refechamento de juntas (excepto a argamassa NHL_2,5Mk_H por apresentar um Ed demasiado elevado para aplicação em rebocos exteriores). De um modo geral, as argamassas com cura S apresentam características mecânicas dentro da gama definida para a aplicação em rebocos exteriores e interiores (excepto a argamassa NHL_5Mk_S por apresentar um Ed demasiado baixo). No entanto, para a aplicação de refechamento de juntas, todas as argamassas com cura S apresentam características mecânicas inferiores às sugeridas para aplicação em edifícios antigos.

Em relação ao comportamento face à água, avaliado pelo parâmetro CC, nenhuma das argamassas do presente estudo cumpre os requisitos definidos, nem para aplicação em rebocos exteriores, nem para refechamento de juntas.

Quadro 4.5 – Verificação dos requisitos definidos por Veiga (VEIGA et al., 2002)

Argamassa	Reboco exterior/interior			Reboco exterior	Refechamento de juntas			
	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]	Rt [MPa]	Rc [MPa]	Ed [MPa]	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]
NHL_M	✓	✓	✓	↑	✓	✓	✓	↑
NHL_2,5Mk_M	✓	✓	✓	↑	✓	✓	✓	↑
NHL_5Mk_M	✓	✓	✓	↑	✓	✓	✓	↑
NHL_S	✓	✓	✓	↑	↓	↓	↓	↑
NHL_2,5Mk_S	✓	✓	✓	↑	↓	✓	↓	↑
NHL_5Mk_S	✓	✓	↓	↑	↓	✓	↓	↑
NHL_H	✓	✓	✓	↑	✓	✓	✓	↑
NHL_2,5Mk_H	✓	✓	↑	↑	✓	✓	✓	↑
NHL_5Mk_H	✓	✓	✓	↑	✓	✓	✓	↑

↑- Valor demasiado elevado ↓- Valor demasiado baixo ✓- Valor dentro do intervalo

Mais uma vez se considera que o comportamento face à água poderia talvez ser melhorado através de uma optimização da areia utilizada.

4.7. Comparação com Resultados de Outros Trabalhos

Neste subcapítulo é feita uma comparação dos resultados obtidos no presente estudo com os resultados obtidos por outros autores, apresentados no capítulo 2. A comparação é realizada através de quadros de setas, em que as setas orientadas para cima indicam que as argamassas estudadas neste trabalho apresentam valores superiores às argamassas do referido autor, e as setas para baixo indicam valores inferiores.

Este estudo surge no seguimento e complementarmente ao estudo realizado por Grilo (GRILO, 2013; GRILO et al., aceite para publicação; GRILO et al., em revisão para publicação). Como referido anteriormente, o autor realizou e caracterizou argamassas de NHL3,5 com percentagens de substituição mássica de cal por metacaulino de 0%, 10% e 20%. Os materiais utilizados foram os mesmos que os do presente estudo (só variou o lote da NHL) e as curas a que se sujeitaram as argamassas foram as mesmas (M, S e H). Só foi efectuada caracterização em provetes prismáticos.

Na Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e no Quadro 4.6 apresenta-se uma comparação entre os resultados dos ensaios de resistência mecânica obtidos neste trabalho com os obtidos no estudo realizado por Grilo (GRILO, 2013; GRILO et al., 2014; GRILO et al., aceite para publicação).

Da observação da Figura 4.17, Figura 4.18, Figura 4.19 e no Quadro 4.6 verifica-se, de um modo geral, que as argamassas estudadas neste trabalho apresentam valores de resistências mecânicas inferiores às das argamassas estudadas por Grilo (GRILO, 2013; GRILO et al., 2014; GRILO et al., aceite para publicação). Esta redução pode ser benéfica, visto que certas argamassas estudadas pelo autor obtiveram resistências mecânicas demasiado elevadas para a aplicação em edifícios antigos.

As argamassas sem metacaulino (NHL) estudadas neste trabalho apresentam valores diferentes aos das argamassas homólogas (inferiores) caracterizadas por Grilo, o que poderá ter origem nos diferentes lotes de cal utilizados nos dois estudos.

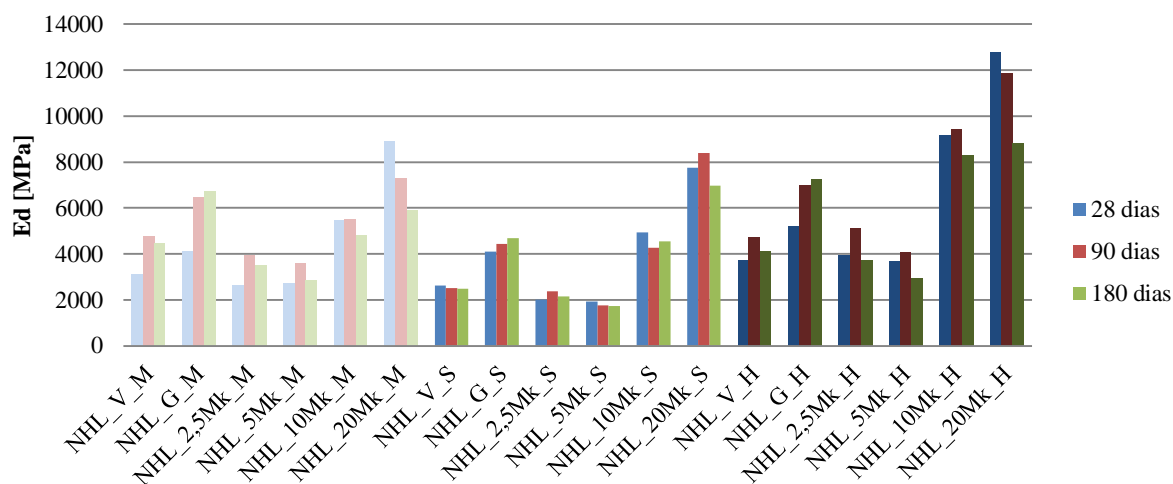


Figura 4.17 – Módulo de elasticidade das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

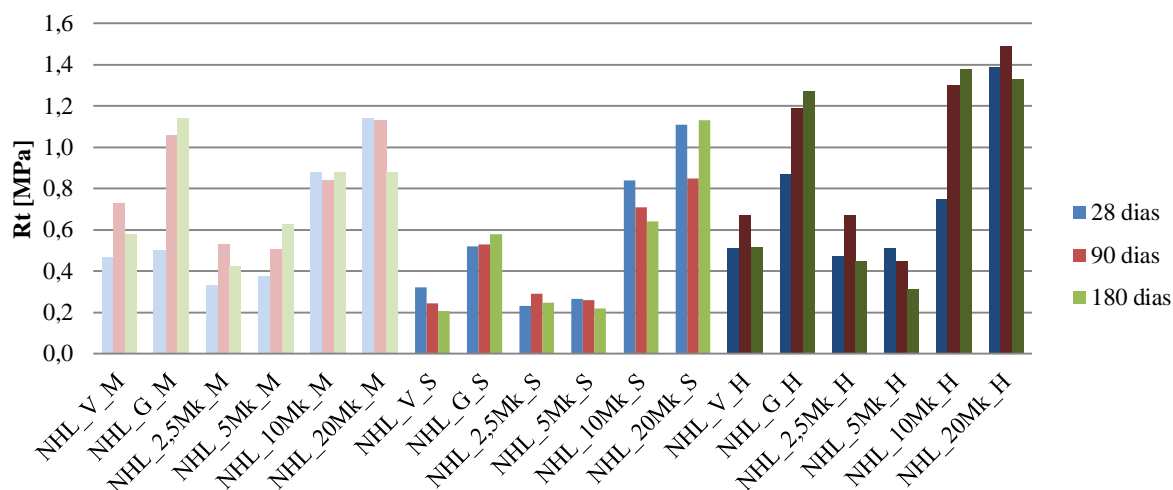


Figura 4.18 – Resistência à tracção das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

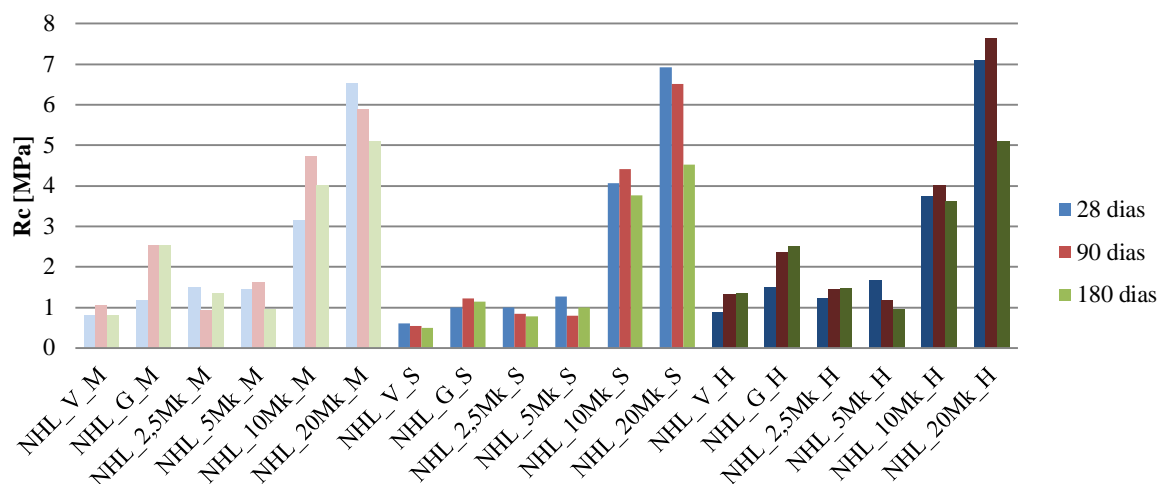


Figura 4.19 – Resistência à compressão das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

Quadro 4.6 – Comparação entre as propriedades mecânicas das argamassas estudadas e as de Grilo (GRILO, 2013)

		(GRILO, 2013)																							
Argamassas	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	
	↙	↙	↙	→	↙	↙	↘	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↘	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_2,5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↗	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_2,5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_2,5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
NHL_5Mk	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	↙	
	Ed [MPa]		Rt [MPa]		Rc [MPa]		Ed [MPa]		Rt [MPa]		Rc [MPa]		Ed [MPa]		Rt [MPa]		Rc [MPa]								
	Cura M						Cura S						Cura H												

Na Figura 4.20, Figura 4.21, Figura 4.22 e no Quadro 4.7 encontra-se uma comparação entre o comportamento face à água das argamassas do presente trabalho com as estudadas por Grilo (GRILO, 2013).

Analisando as argamassas da cura M a todas as idades e das curas S e H aos 28 dias, verifica-se de que, de um modo geral, as argamassas do presente estudo apresentam maiores valores de CC e menores valores TS, traduzindo-se numa diminuição do parâmetro AB. Na cura S e aos 90 e 180 dias, verifica-se uma melhoria do comportamento face à água de todas as argamassas do presente estudo em comparação com a argamassa sem metacaulino (NHL) caracterizada por Grilo. Já na cura H e aos 90 e 180 dias, verifica-se uma melhoria do comportamento face à água das argamassas com 0%, 2,5% e 5% de metacaulino deste estudo, comparativamente às argamassas sem metacaulino e com 10% de metacaulino do estudo referido.

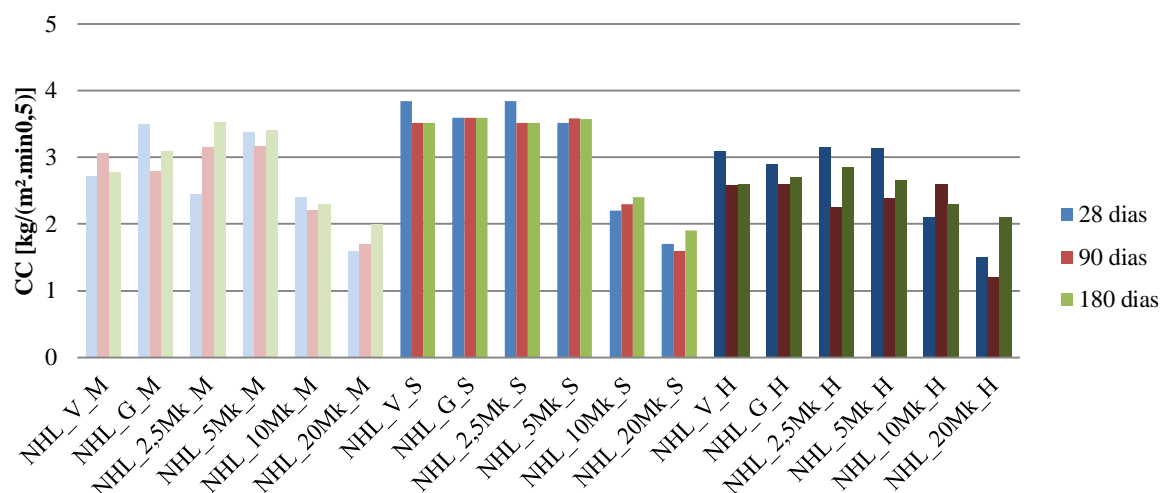


Figura 4.20 – Coeficiente de capilaridade das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

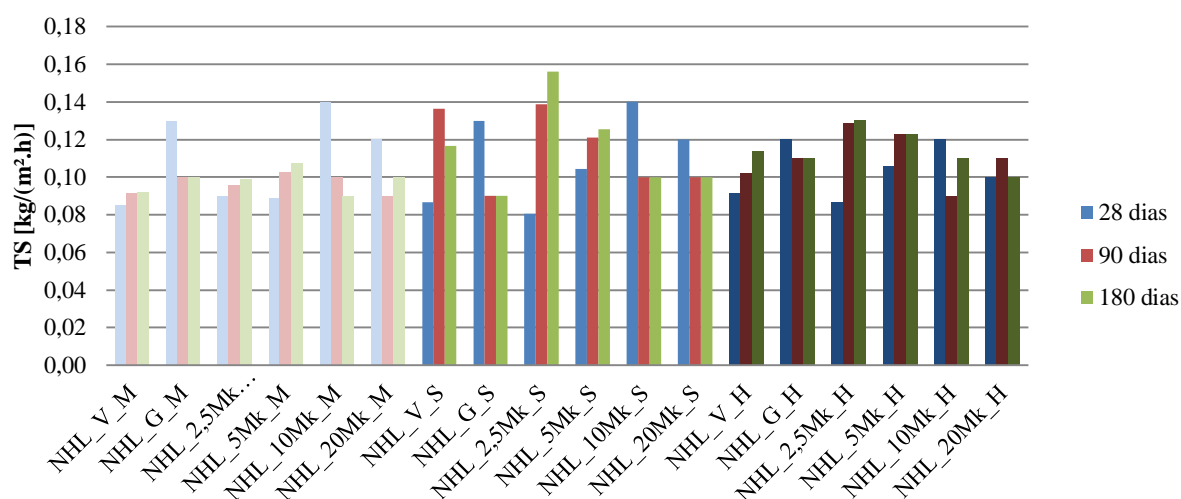


Figura 4.21 – Taxa de secagem das argamassas com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

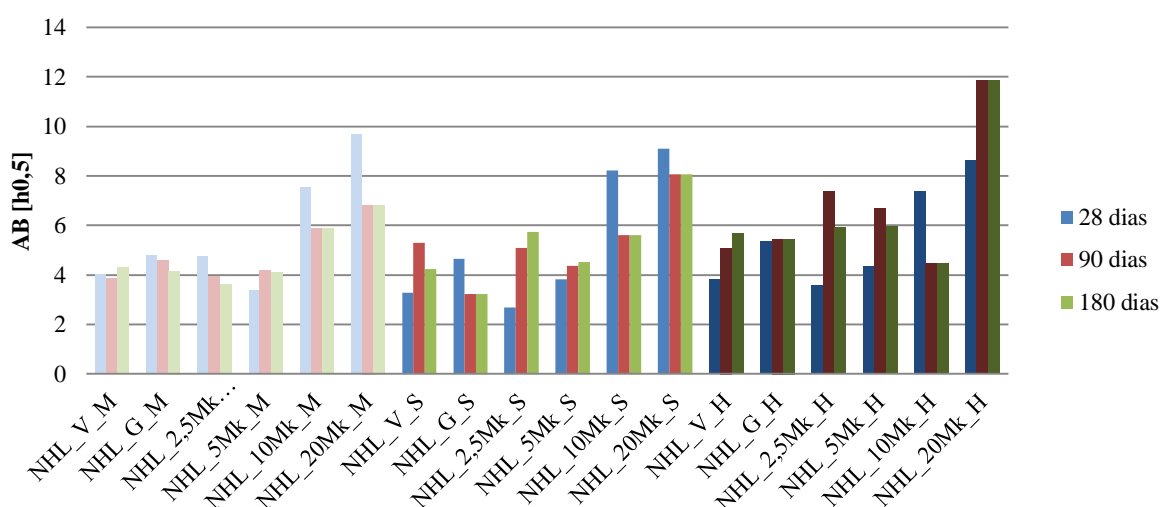


Figura 4.22 – Parâmetro AB com 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de Mk nas curas M, S e H e a todas as idades

Quadro 4.7 – Comparação entre o comportamento face à água das argamassas estudadas e as de Grilo (GRILO, 2013)

	(GRILO, 2013)																								
Argamassas	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	NHL	NHL com 10% Mk	NHL com 20% Mk	
NHL	↴	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↴	↴	↴	
NHL_2,5Mk	↴	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↴	↴	↴	
NHL_5Mk	↴	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↴	↴	
NHL	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↴	↗	↴	↗	↴	
NHL_2,5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL_5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL	↴	↗	↗	↴	↗	↴	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL_2,5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL_5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL	↴	↗	↗	↴	↗	↴	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL_2,5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
NHL_5Mk	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↴	↴	↗	↗	↗	↗	↗	↴	
	CC [kg/(m²min.½)]				TS [kg/(m².h)]				AB				CC [kg/(m²min.½)]				TS [kg/(m².h)]				AB				
	Cura M								Cura S								Cura H								

No Quadro 4.8 faz-se uma comparação entre os resultados do ensaio de absorção de água sob baixa pressão das argamassas aplicadas em suporte de tijolo da cura M deste trabalho com as argamassas aplicadas em muretes exteriores (LINO, 2013). Através do quadro verifica-se que as argamassas deste trabalho apresentam maiores velocidades de absorção de água do que as argamassas caracterizadas por Lino (mesmo no caso das argamassas análogas). Esta diferença pode ser explicada por diferentes factos: as argamassas serem aplicadas em suportes ligeiramente diferentes (num caso apenas um tijolo enquanto no outro caso numa alvenaria de tijolo); pela influência da cura – inicialmente a 95% e a partir da 1ª semana, em ambiente marítimo no caso da argamassa aplicada sobre um tijolo, enquanto sobre murete esteve desde a aplicação em condições de exposição natural, em ambiente urbano (no LNEC); pelo facto de no caso dos provetes sobre suporte se tratar apenas da aplicação de uma camada de argamassa sobre o tijolo, enquanto no caso do murete se tratava de um sistema de reboco constituído por salpisco e camada de base.

No Quadro 4.9 comparam-se os resultados de absorção de água sob baixa pressão aos 5 m obtidos no presente trabalho com os resultados obtidos por Fontes (FONTES, 2013). Através do quadro é possível observar que, de um modo geral, as argamassas apenas com Mk apresentam menores velocidades de absorção de água do que as argamassas com resíduo cerâmico e resíduo cerâmico mais Mk, ou seja, a introdução de resíduo cerâmico aumenta a velocidade de absorção de água das argamassas.

Quadro 4.8 – Comparação de alguns parâmetros do ensaio de absorção de água sob baixa pressão das argamassas estudadas neste trabalho com as de Lino (LINO, 2013)

Argamassas	(LINO, 2013)				
	NHL	NHL_5Mk	NHL	NHL_5Mk	
NHL	↑	↑	↑	↑	28 dias
NHL_5Mk	↑	↑	↓	→	
NHL	↑	↑	↑	↑	90 dias
NHL_5Mk	↑	↑	↑	→	
NHL	↑	↓	↑	↑	180 dias
NHL_5Mk	↑	↑	↑	↑	
			Coeficiente de absorção de água aos 4ml [kg/(m².t½)]		
			Coeficiente de absorção de água aos 5m [kg/(m².t½)]		

Quadro 4.9 – Comparação do coeficiente de absorção de água aos 5 m das argamassas estudadas neste trabalho com as de Fontes na cura SP (FONTES, 2013)

90 dias	(FONTES, 2013)		90 dias
Argamassa	Coeficiente de absorção aos 5 m [kg/(m².min ^{0,5})]		
	NHL_5Rc_SP	NHL_5Rc+5Mk_SP	
NHL	↓	↓	
NHL_2,5Mk_SP	↑	↓	
NHL_5Mk_SP	↓	↓	

Rc – Resíduo cerâmico

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões Gerais

O estudo desenvolvido, que se encontra inserido nos projectos financiados pela FCT LIME-CONTECH e METACAL, teve como objectivo avaliar a influência do teor em metacaulino, da cura e da idade nas características de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 e contribuir para um maior conhecimento de argamassas efectuadas com base numa cal de fabrico nacional e formulação recente.

Concluído o estudo, considera-se que os todos os objectivos inicialmente planeados foram cumpridos e que efectivamente se contribuiu para um maior conhecimento de argamassas de cal hidráulica natural e desta cal e metacaulino.

Em termos de resultados obtidos através dos ensaios realizados a argamassas no estado fresco, verificou-se um aumento da massa volúmica e uma diminuição do espalhamento (para a mesma relação água/ligante) com o aumento do teor em metacaulino. A capacidade de retenção de água das argamassas estudadas apresentou-se muito semelhante entre todas elas, não se registando diferenças significativas entre as argamassas com metacaulino e a argamassa de referência (sem metacaulino).

Tendo em conta a influência das diferentes composições verificou-se que, de um modo geral, as argamassas com metacaulino apresentam em relação às argamassas sem metacaulino, aumentos significativos na resistência à compressão. No entanto, a resistência à tracção e particularmente o módulo de elasticidade dinâmico apresentam, na generalidade das argamassas, uma tendência inversa à obtida na resistência à compressão, ou seja, uma diminuição. Tal como referido no subcapítulo 4.2, esta diminuição destes dois parâmetros poderá ser resultante da presença de microfissuras dos provetes, sendo que os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade são mais sensíveis a esta possível ocorrência, que pode surgir logo no manuseamento dos provetes enquanto frescos.

Além da influência da composição, verificou-se que as diferentes curas influenciam bastante os resultados. Constatou-se que as argamassas sujeitas à cura H apresentam maiores resistências mecânicas, seguidas de perto pelas sujeitas à cura M; por outro lado as argamassas sujeitas à cura S obtiveram as menores resistências.

Em termos de comportamento face à água, não se verificam alterações significativas da velocidade de absorção de água, nem da quantidade de total de água absorvida nas argamassas com substituição parcial (de 2,5% e 5%) de massa de NHL por metacaulino. De um modo geral as argamassas da cura S, independentemente do teor em metacaulino, apresentaram maiores velocidades de absorção, mas por outro lado, em termos de capacidade de secagem, registaram os melhores resultados. Em relação ao parâmetro AB, que relaciona a velocidade inicial de absorção de água por capilaridade com a

velocidade inicial de secagem, destacam-se pela positiva as argamassas da cura H, que apresentaram os maiores valores de AB.

No ensaio de resistência ao ataque dos sulfatos verificou-se, aos 28 dias, que as argamassas com metacaulino foram as que menos resistência ofereceram. Nas restantes idades não se registaram tendências entre as diferentes composições.

A influência com a idade também se revelou importante, registando-se diferenças significativas em certos parâmetros entre as diferentes idades. No entanto, não se pode generalizar nenhuma conclusão, nem a nível dos parâmetros mecânicos, nem a certos parâmetros do comportamento face à água, uma vez que os resultados obtidos não sugerem nenhuma tendência. Por exemplo, relativamente ao módulo de elasticidade e à resistência à tracção, verifica-se nas curas M e H um aumento de Ed dos 28 para os 90 dias e uma diminuição dos 90 para os 180 dias; na cura S as variações dos resultados são muito reduzidas entre idades. Já na resistência à compressão não existe uma tendência definida com a evolução da idade. No caso dos parâmetros do comportamento face à água apenas se registaram variações significativas nos parâmetros de taxa de secagem e índice de secagem, sugerindo que as velocidades de secagem, tanto inicial como global, aumentam com a idade. No que respeita ao parâmetro AB, verificou-se com a idade um aumento deste parâmetro, o que constitui um facto positivo. Em relação ao ataque dos sulfatos, verificou-se uma melhoria significativa das resistências das argamassas ao ataque deste tipo de sais com evolução da idade, o que também se salienta como muito positivo.

Em termos de aplicação das argamassas em edifícios antigos, grande parte das argamassas estudadas neste trabalho cumpre o definido por Veiga (VEIGA et al., 2002) em termos de características mecânicas para utilização em rebocos exteriores/interiores e para refechamento de juntas em grande parte dos parâmetros.

Dado que grande parte das argamassas caracterizadas neste trabalho cumprem os requisitos mecânicos para aplicação em edifícios antigos (VEIGA et al., 2002) e são classificados como CS I ou CS II pela norma EN-998-1:2000 (CEN, 2010), é possível concluir que estas são adequadas para utilização na reabilitação e conservação de edifícios antigos e recentes.

Concluindo, considera-se que este trabalho contribui positivamente para o conhecimento das características de argamassas de NHL3.5, uma vez que se verifica que argamassas com metacaulino em baixas percentagens (2,5% a 5%) são mais compatíveis com os suportes de edifícios antigos que as argamassas com percentagens mais altas de metacaulino (10% a 20%) (GRILO, 2013).

5.2. Desenvolvimentos Futuros

Finalizado este trabalho, considera-se importante aprofundar os conhecimentos relativos a este tema. Deste modo sugerem-se os seguintes estudos:

- Desenvolver mais estudos sobre este tipo de argamassas, com objectivo de aumentar a amostra de argamassas em análise e robustecer as conclusões deste trabalho.
- Efectuar a análise dos compostos mineralógicos presentes nas argamassas estudadas, através de ensaios de DRX .
- Efectuar uma análise da estrutura porosa das argamassas, através do ensaio de porosimetria de mercúrio.
- Avaliar e caracterizar as argamassas estudadas neste trabalho a idades mais avançadas.
- Comparar a caracterização em curas de laboratório com a caracterização em condições de exposição natural através das argamassas aplicadas em sistemas de rebocos na Estação de Exposição Natural de Revestimentos.
- Acompanhar o envelhecimento em condições de exposição natural dos rebocos aplicados no murete, em função da sua exposição.

BIBLIOGRAFIA

- ALVES, S. (2001). *Paredes exteriores de edificios em pano simples. Fundamento, desempenho e metodologias de análise*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto.
- AMBROISE, J., MURAT, J., & PERA, J. (1985). *Hydration Reaction and Hardening of Calcined Clays and Related Minerals. IV. Experimental Conditions for Strength Improvement on Metakaolin Minicylinders*. Cement and Concrete Research, Vol.15, 83-88.
- APPS, C. (2001). *Avaliação da variabilidade da técnica de ensaio do tubo de Karsten na medição da permeabilidade à água líquida em revestimentos de ladrilhos cerâmicos e argamassas*. Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa.
- BRITO, V. (2011). *Coating applied on damp building substrates: performance and influence on moisture transport*. Journal of Coating Technology and Research, Vol. 8, 513-525.
- CARNEIRO, J. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- CEN. (1998a). *EN 1015-2:1998 - Methods of test for mortars for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (1998b). *EN 1015-6:1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (1998c). *EN 1015-7:1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (1999a). *EN 1015-3:1999 - Methods of test for mortar for masonry. Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (1999b). *prEN 1015-8: Methods of test for mortar for masonry – Part 8: Determination of water retentivity of fresh mortar*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (1999c). *EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (2002). *EN 1015-18:2002 - Methods of test for mortars for masonry. Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (2009). *EN 15801:2009 - Conservation of cultural property. Test methods. Determination of water absorption by capillarity*. Comité Européen De Normalisation, Brussels.
- CEN. (2010). *EN 998-1 – Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*. brussels.
- CORTES, D., KIM, H., PALOMINO, A., & SANTAMARINA, J. (2008). *Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands*. Georgia Construction Aggregate Association (GCAA), Georgia, USA.

- DIAS, I. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra. A influência da terra como agregado parcial*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- EL-TURKI, A., BALL, R., & ALLEN, G. (2007). *The influence of relative humidity on structural and chemical changes during carbonation of hydraulic lime*. Cement and Concrete Research, Vol. 37, 1233-1240.
- FARIA, P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - contributo para o estudo da influência dos ligantes*. Tese de Doutoramento, FCT-UNL, Caparica.
- FARIA, P. (2011). *PROJECTO FCTMETACAL - Procedimentos de ensaio de argamassas*. FCT-UNL, Departamento de Engenharia Civil, Caparica.
- FARIA, P., HENRIQUES, F., & RATO, V. (2007). *Argamassas correntes: influência do tipo de ligante e do agregado*. In "2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção", APFAC. Lisboa.
- FARIA, P., HENRIQUES, F., & RATO, V. (2008). *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*. Culture Heritage. Vol. 9, 338-356.
- FARIA, P., SILVA, V., & FLORES-COLEN, I. (2012a). *Argamassas de cal hidráulica e pozolanas artificiais: avaliação laboratorial*. "4º Congresso Português de Argamassas de Construção". APFAC, Coimbra.
- FARIA, P., SILVA, V., GRILO, J., CARNEIRO, J., BRANCO, T., & MERGULHÃO, D. (2012). *Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural*. FCT-UNL, Caparica.
- FONTES, T. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- FONTES, T., FARIA, P., & SILVA, V. (2012). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural com metacaulino e resíduo cerâmico*. "4º Congresso Nacional de Construção". Coimbra.
- FURLAN, V., & BISSEGER, P. (1975). *Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique*. Revue suisse d'Art et d'Archéologie, Vol. 32, 1-14.
- GAMEIRO, A., SILVA, A., FARIA, P., GRILO, J., BRANCO, J., VEIGA, R., et al. (2013). *Physical and chemical assessment of lime-metakaolin mortars: Influence of binder:aggregate ratio*. Cement and Concrete Composites, Vol.5, 264-271.
- GAMEIRO, A., SILVA, A., VEIGA, M., & VELOSA, A. (2012). *Hydration products of lime-metakaolin pastes at ambient temperature with ageing*. Thermochimica Acta, Vol. 535, 36-41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.06.010>.
- GRILO, J. (2013). *Caracterização de argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.

- GRILO, J., FARIA, P., VEIGA, R., SANTOS, A., SILVA, V., & VELOSA, A. (em revisão). *New Natural Hydraulic Lime mortars – Physical and microstructural properties in different curing conditions*. Construction and Building Materials.
- GRILO, J., SANTOS, A. S., FARIA, P., GAMEIRO, A., & VELOSA, A. (aceite para publicação). *Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions*. Construction and Building Materials. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045>.
- GROOT, C. (2012). *TC 203-RHM: Repair mortars for historic masonry – Performance requirements for renders and plasters*. Materials & Structures. Vol.45, 1277-1285.
- HENRIQUES, F. (2000). *Fichas de Ensaio - Análise de argamassas. Determinação da retenção de água*. Fe32. FCT-UNL, Caparica.
- HENRIQUES, F. (2007). *Comportamento higrotérmico de Edifícios*. FCT-UNL.
- HENRIQUES, F., & FARIA, P. (2008). *O papel da investigação no estudo das argamassas de substituição na conservação do património*, Revista Engenharia Civil. Universidade do Minho.
- HENRIQUES, F., & FARIA, P. (2006). *Argamassas de substituição na conservação do património*. Construção Magazine.
- IPQ. (2000). *NP EN 1097-3:2000 - Ensaios para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - parte 3: Método para determinação da massa vólumica e dos vazios*. Instituto Português da Qualidade, Almada.
- IPQ. (2001). *NP EN 12370:2001 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à cristalização de sais*. Instituto Português de Qualidade, Almada.
- IPQ. (2002). *NP EN 933-1:2000 - Ensaios das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Método de Peneiração*. Instituto Português da Qualidade, Almada.
- IPQ. (2003). *NP EN 459-1 - Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Almada.
- IPQ. (2007). *NP EN 14146:2006 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental)*. Instituto Português de Qualidade, Almada.
- IPQ. (2008). *NP EN 1936:2008 - Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação das massas volúmicas real e aparente e das porosidades total e aberta*. Instituto Português de Qualidade, Almada.
- IPQ. (2011). *NP EN 459-1:2011 - Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Instituto Português da Qualidade, Almada.
- IPQ. (2012). *NP EN 197-1:2012 - Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade, Almada.

- JAMÚ, N. (2013). *Desenvolvimento e caracterização de argamassas de cal aérea e terra: A influência da terra como ligante*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- LINO, G. (2013). *Caracterização in situ de rebocos com base em cal e metacaulino aplicados em muretes experimentais*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- LNEC. (2002). *FE Pa 39:2002 - Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa.
- LNEC. (2010). *FE Pa 43:2010 - Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de caracte-rísticas mecânicas por ultra-sons*. Lisboa.
- MALINOWSKI, R., & GARFINKEL, Y. (1991). *Prehistory of Concrete*. Concrete International. Vol. 3, 62-68.
- MARAVELAKI-KALAITZAKI, P., BAKOLAS, A., KARATASIOS, I., & KILIKOGLU, V. (2005). *Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete*. Cement and Concrete Research. Vol. 35, 1577-1586.
- MARGALHA, M. (2008). *Conservação e Recuperação do Património*. Universidade de Évora, Évora.
- MASSENA, R. (2011). *Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- MOISÉS, F., & CABRERA, J. (2002). *The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of Metakaolin–lime–water systems*. Cement and Concrete Research. Vol. 32, 133-138.
- PACHECO-TORGAL, F., FARIA, J., & JALALI, S. (2012). *Some considerations about the use of lime–cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil?* Construction and Building Materials. Vol.30, 488-494.
- PALOMO, A., BLANCO-VARELA, M., MARTINEZ, S., PUERTAS, F., & FORTES, C. (2003). *Historic Mortars: Characterization and Durability. New Tendencies for Research*. Eduardo Torroja Institute, Madrid (Spain).
- PATRÍCIO, C. (2013). *Caracterização de caldas de cal hidráulica natural com metacaulino para consolidação de alvenarias antigas*. Dissertação de Mestrado, FCT-UNL, Caparica.
- PAVIA, S., & HANLEY, R. (2010). *Flexural bond strength of natural hydraulic lime mortar and clay brick*. Materials and Structures. Vol. 43, 913-922.
- PENAS, F. (2008). *Argamassas de cal hidráulica para revestimentos de paredes*. Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa.
- RASHAD, M. (2012). *Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview*. Construction and Building Materials. Vol. 41, 303-318.
- RATO, V. (2006). *Influência da microestrutura morfológica no comportamento de argamassas*. Tese de Doutoramento, FCT-UNL, Caparica.

- RILEM. (1980a). *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommendations provisoires*. Paris.
- RILEM. (1980b). *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. Test n.º II.5 – Evaporation curve*.
- SABBIONI, A., & BONAZA, Z. G. (2002). *Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal*. Journal Of Cultural Heritage. Vol.3, 83-88.
- SAMET, B., MNIF, T., & CHAABOUNI, M. (2007). *Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement*. Cement and Concrete Composites. Vol. 29, 741-749.
- SAMPAIO, J. C. (1978). *Materiais de Construção*. AEFEUP, Universidade do Porto.
- SANDIN, K. (1995). *Mortars for Masonry and Rendering – Choice And Application*. Building Issues. Vol. 7.
- SANTOS, A., & VEIGA, R. (2012). *Argamassas compatíveis para edifícios antigos. Jornadas LNEC – 2ª Jornadas de Investigação e Inovação – Cidades e desenvolvimento*. LNEC, Lisboa.
- SCHNEIDER, H., & KOMARNENI, S. (2005). *Mullite, VCH*.
- SEQUERIA, A., FRADE, D., & GONÇALVES, P. (2007). *Cal Hidráulica - Um ligante para reabilitação*. Comunicação do "2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção", APFAC, Lisboa.
- SIDDIQUE, R., & KLAUS, J. (2009). *Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Applied Clay Science. Vol. 43, 392-400.
- THOMSON, M., & GROOT, C. (1999). *RILEM TC Characterization of old mortars with respect to their repair*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- TIRONI, A., TREZZA, M., SCIAN, A., & IRASSAR, E. (2012). *Incorporation of Calcined Clays in Mortars: Porous Structure and Compressive Strength*. Procedia Materials Science. Vol.1, 366-373.
- VEIGA, M. (2003). *As argamassas na conservação. Actas das 1ªs Jornadas de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro*. LNEC.
- VEIGA, M., & TAVARES, M. (2002). *Características de paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura. Actas do Encontro A indústria das tintas no início do século XXI*. APTETI, Lisboa.
- VEIGA, M., MARGALHA, M. G., & BRITO, J. (2007). *Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea*. APFAC, Lisboa.
- VEIGA, M., VELOSA, A., & MAGALHAES, A. (2009). *Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: Characterization and performance evaluation*. Construction and Building Materials. Vol. 23, 318-327.
- VELOSA, A. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.

ANEXOS

Anexo I – Ficha técnica da cal NHL3.5

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 - NATURAL HYDRAULIC LIME

T.C.E.085.0

1. DESCRIPTION

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is a hydraulic binder composed in its majority by calcium silicates and aluminates, and calcium hydroxide. It is obtained by the burning of marlstone, followed by grinding.

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is classified as NHL 3,5 according to the NP EN 459-1:2010.

Secil NATURAL LIME NHL 3,5 is a unique binder. In addition to featuring hydraulic properties, it also suffers a setting process by carbonation.

2. FIELD OF APPLICATION

In the production of mortars, as the only binder or mixed with other hydraulic or non-hydraulic binders, giving them workability and flexibility, significantly reducing retraction in hydraulic mortars (for ex. masonry, rendering and finishing mortars).

In the production of rehabilitation mortars, as only binder, for the execution of internal and external renders, over ancient substrates.

3. PRODUCT CHARACTERISTICS

Physical Characteristics	Value	Standard
Color	Beige	-
Specific Mass (kg/dm ³)	0,65 ± 0,05	EN 459-1
Density (g/cm ³)	2,7	-
Fineness (%)	90 µm ≤ 15,0 200 µm ≤ 2,0	EN 459-1
Blaine (cm ² /g)	9000	-
Expandability - alternative method (mm)	≤ 20	EN 459-1
Free Water (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Air content (%)	≤ 5	EN 459-1
Penetration (mm)	<10 e >50	EN 459-1
Setting time (h)	initial final	> 1,0 ≤ 30,0

Mechanical Characteristics	Value	Standard
Mechanical compressive strength 28 dias (MPa)	≥ 3,5 e ≤ 10	EN 459-1

Chemical Characteristics	Value	Standard
Sulphates (SO ₄) (%)	≤ 2,0	EN 459-1
Free Lime Ca(OH) ₂ (%)	≥ 25,0	EN 459-1

4. PRODUCTION OF MORTARS

The dosage of Secil NATURAL LIME NHL 3,5 in a mortar must be adequate for the intended final use. In rendering and bedding mortars Secil NATURAL LIME NHL 3,5, has an important role as only binder or mixed with others,

Previously mix the Secil NATURAL LIME NHL 3,5 with the aggregate and afterwards add water in the necessary amount in order to obtain a good workability. As an indicative value, please use a water/binder ratio of 0,6 expressed by volume.

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Customer Support: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



www.secilmartinganca.pt

Secil NATURAL LIME NHL 3,5

NHL 3,5 - NATURAL HYDRAULIC LIME



Stone Quarry



Lime Kilns



Burnt limestone

Complementary Advice

- ▶ Excess of water in the mixture is prejudicial to the physical properties of the render;
- ▶ Always use the minimum amount of water necessary to ensure a good workability;
- ▶ The mixing water must be free of any impurities (clay, organic material), whenever possible, tap water must be used;
- ▶ Once the mortar ratio is determined, keep the dosage and mixing times constant.

Restrictions

Do not apply mortars to temperatures below 5°C and over 30°C, avoiding application in strong winds or high solar exposure.

Do not use softened mortars or that have initiated their setting time.

Avoid rapid drying of the mortars, spraying the substrate 1 or 2 hours before application, and spraying again as soon as the mortars show sufficient resistance. Repeat this procedure 1, 2 and 7 days after.

5. HYGIENE AND SAFETY

(DOES NOT DISMISS CONSULTATION OF THE PRODUCT SAFETY FILE)

- ▶ May cause skin irritation;
- ▶ May cause severe eye damage;
- ▶ May cause respiratory irritation;
- ▶ Keep away from children;
- ▶ Use protective gloves/ garments /eye protection / facial protection;
- ▶ If in contact with eyes: wash carefully with water for several minutes. Seek immediate medical advice;
- ▶ If in contact with skin: wash thoroughly with water and soap;
- ▶ Do not breathe dust / vapours;
- ▶ Remove patient to fresh air and keep at rest in a position comfortable for breathing;
- ▶ Dispose of content / packaging according to legislation in force.

6. PACKAGING AND VALIDITY

Packaging

- ▶ 25 kg bags on plastified pallets
- ▶ In bulk, for use in silo systems

Validity

Secil Natural Hydraulic Lime must be transported, handled and stored in its original packaging (should only be opened for immediate use), away from humidity and exposure to heat.

In these conditions are respected, it can be stored for a **12 month** limit

Once the application conditions of our products are beyond our reach, we will not be held responsible for its incorrect usage. It is the client's duty to verify the suitability of the product for the predicted use. In any case, our responsibility is limited to the value of goods supplied. The information shown on this file may be changed without previous notice. In case of doubt, and if you should need any additional information, please contact our technical services.

Draft Version October 2011
TC.E 085.0

Secil Argamassas

Secil Martingança, S.A.
Customer Support: Apartado 2 | 2406 – 909 – Maceira – LRA – Portugal
Tel: +351 244 770 220 | Fax: +351 244 777 997 | E-mail: comercial@secilmartinganca.pt



www.secilmartinganca.pt

Anexo II – Ficha técnica do metacaulino

ARGICAL-M 1200S



PRODUCT SPECIFICATION

Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by micronising and calcining a kaolinitic clay from the Charentes basin.

ARGICAL-M 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. It is an amorphous non-crystallised material, constituted of lamellar particles.

ARGICAL-M 1200S est une pouzzolane artificielle (métakaolin), obtenue par broyage et calcination d'une argile kaolinique du bassin des Charentes.

ARGICAL-M 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé, de composition générale $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. C'est un matériau amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire.

The technical details contained in this data sheet are given in all good faith for indicative purpose only, and do not constitute a guarantee by AGS Minéraux.

Sales are in accordance with our "Conditions of Sale", copies of which will be supplied on request.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'emportent pas obligation pour le fournisseur. Elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications.

Seule la fiche de Spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Ventes engage notre société auprès des clients.

PRODUCT USE

Additive for concretes, mortars and coatings, made from Portland cement or lime

Domaine d'utilisation

Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux

CHEMICAL ANALYSIS

Analyse chimique

SiO ₂	55 %
Al ₂ O ₃	39 %
K ₂ O + Na ₂ O	1,0 %
Fe ₂ O ₃	1,8 %
TiO ₂	1,5 %
CaO + MgO	0,6 %
	1 %

LOSS ON IGNITION

Perte au feu

TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

Caractéristiques physiques moyennes

pH

Pozzolanic index (Chapelle test) / Indice pouzzolanique

Brightness photovolt blue filter / Blancueur photovolt filtre bleu

Specific area (BET) / Surface spécifique (BET)

Water demand (Marsh cone) / Demande en eau (Cône de Marsh)

Specific gravity / Masse spécifique

Bulk density / Densité apparente

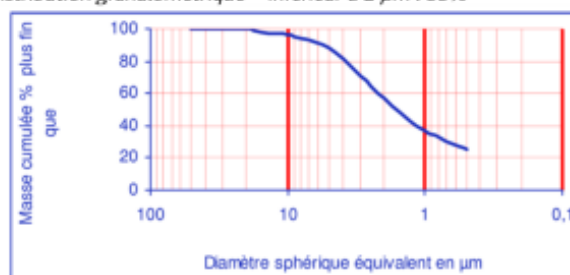
Loose / Non tassé

Tamped / Tassé

6
1400 mg Ca(OH) ₂ /g
74 %
19 m ² /g
1650 g/kg
2,2 g/cm ³
250 kg/m ³
400 kg/m ³

SIEVE ANALYSIS

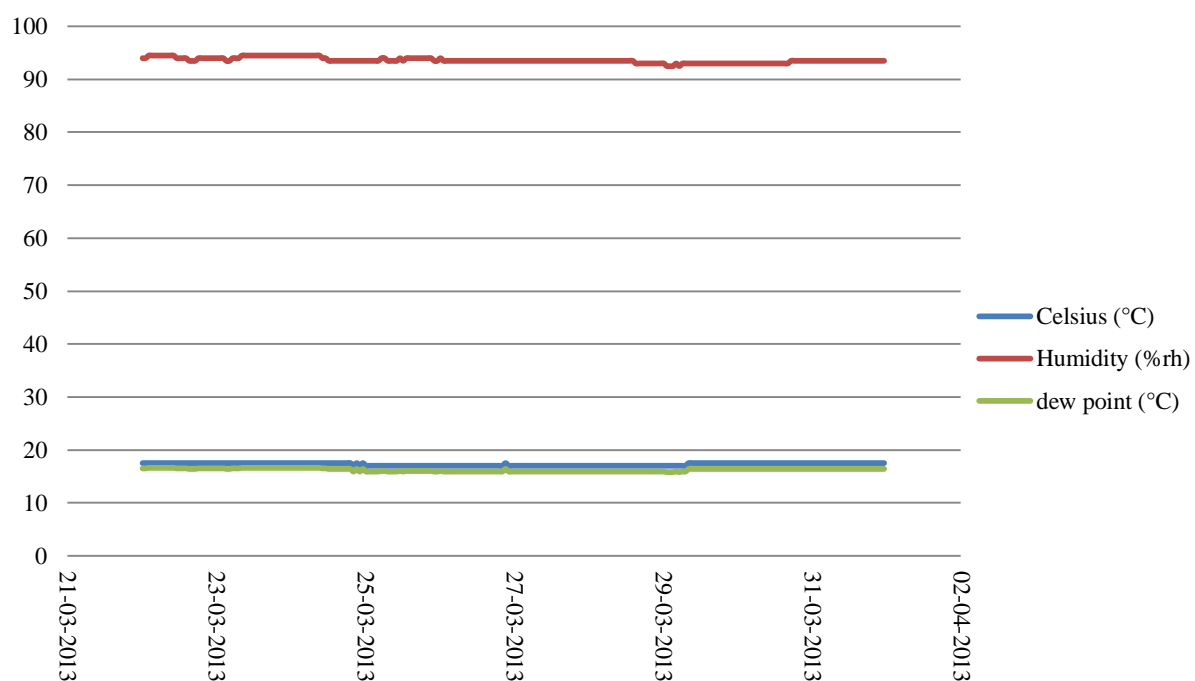
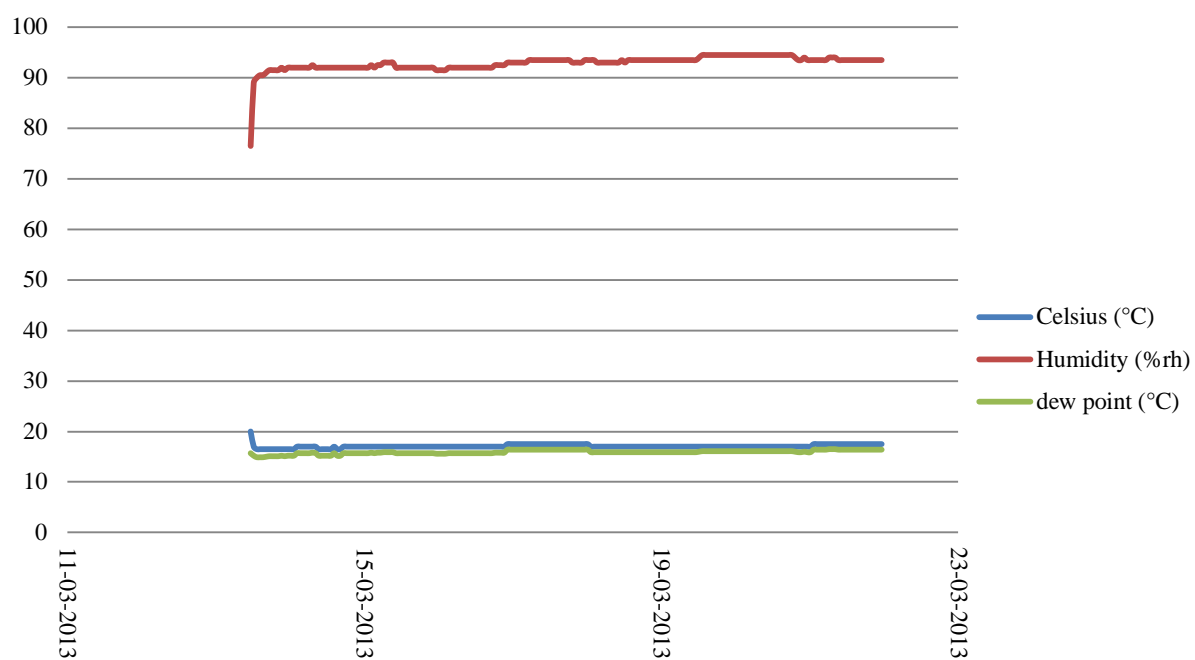
Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



irac
05 46 04 17 11
Fax : +33 (0)5 46 04 21 05
www.ags-mineraux.com
commercial@ags-mineraux.com

Revision 4 – 2008/07/24



Anexo III – Dados climáticos da câmara de cura húmida

Anexo IV – Resultados individuais de ensaios realizados**Quadro IV.1 – Espalhamento**

Amassadura	Argamassa	Espalhamento [mm]			
		Esp 1	Esp 2	Méd	DP
Am.1	NHL	164	175	170	6
Am.2		174	182		
Am.3		167	164		
Am.4		163	166		
Am.5		172	174		
Am.1	NHL_2,5Mk	164	172	165	3
Am.2		164	167		
Am.3		166	163		
Am.4		164	170		
Am.5		160	164		
Am.1	NHL_5Mk	165	162	164	4
Am.2		164	169		
Am.3		166	156		
Am.4		167	162		
Am.5		165	160		

Quadro IV.2 – Retenção de água

	Argamassas	ag [g]	mf [g]	mc [g]	mh [g]	ma [g]	Quantidade de água retida [%]	Média [%]	Dp
NHL3,5	V1	950	6,478	922,113	16,090	34,380	72,0	72,3	5,9
	V1	950	6,437	907,552	15,557	33,175	72,5		
NHL3,5 _2,5Mk	V2	950	6,500	907,115	16,044	33,139	71,2	71,4	3,3
	V2	950	6,430	912,115	15,960	33,553	71,6		
NHL3,5 _5Mk	V3	950	6,455	911,781	15,666	33,525	72,5	72,2	3,6
	V3	950	6,409	908,856	15,741	33,283	72,0		

Quadro IV.3 – Módulo de elasticidade dinâmico, 28 dias

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Di- nâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V11M	474,353	3059	3060	3110	124
			3061			
			3068			
			3086			
	V12M	474,471	3186	3236		
			3020			
			3369			
			3372			
	V13M	477,317	3025	3025		
			3041			
			3015			
			3020			
NHL3,5_2,5Mk_M	V21M	469,701	2598	2618	2636	29
			2604			
			2645			
			2626			
	V22M	463,085	2675	2642		
			2681			
			2596			
			2618			
	V23M	468,357	2613	2648		
			2665			
			2647			
			2668			
NHL3,5_5Mk_M	V31M	471,049	2598	2465	2731	444
			2620			
			2607			
			2038			
	V32M	476,782	3247	3323		
			3382			
			3316			
			3349			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Di- nâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_M	V33M	469,229	2400	2404	2731	444
			2370			
			2420			
			2428			
NHL3,5_S	V11S	470,515	2765	2753	2624	174
			2982			
			2625			
			2641			
	V12S	467,172	2184	2553		
			2681			
			2669			
			2680			
	V13S	469,932	2551	2567		
			2586			
			2562			
			2570			
NHL3,5_2,5Mk_S	V21S	461,519	2184	2126	2022	316
			2086			
			2099			
			2136			
	V22S	464,334	1596	1595		
			1608			
			1581			
			1595			
	V23S	469,208	2349	2346		
			2310			
			2347			
			2380			
NHL3,5_5Mk_S	V31S	461,718	1475	1479	1925	399
			1467			
			1473			
			1501			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Di- nâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_S	V32S	461,572	1866	1851	1925	399
			1845			
			1839			
			1854			
	V33S	459,657	2460	2447		
			2443			
			2449			
			2438			
NHL3,5_H	V11H	482,734	3810	3771	3715	84
			3793			
			3732			
			3749			
	V12H	482,017	3791	3635		
			3568			
			3572			
			3611			
	V13H	487,715	3777	3739		
			3662			
			3759			
			3761			
NHL3,5_2,5Mk_H	V21H	473,927	3308	3073	3937	870
			3016			
			2987			
			2981			
	V22H	493,214	4803	4802		
			4804			
			4795			
			4809			
	V23H	Provete partido				
NHL3,5_5Mk_H	V31H	465,059	3087	3007	3675	946
			2950			
			3076			
			2915			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Di- nâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_H	V32H	Provete partido			3675	946
	V33H	490,061	5007	501		
			5016			

Quadro IV.4 – Módulo de elasticidade dinâmico, 90 dias

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V14M	476,82	4792	4780	4777	32
			4750			
			4770			
			4809			
	V15M	483,722	4785	4775		
			4802			
			4708			
			4806			
V16M	Provete partido					
NHL3,5_2,5Mk_M	V24M	497,58	3638	3690	3952	570
			3718			
			3753			
			3654			
	V25M	473,665	3450	3492		
			3516			
			3498			
			3507			
	V26M	488,665	4457	4670		
			5393			
			4424			
			4418			
NHL3,5_5Mk_M	V34M	472,752	3418	3379	3602	472
			3497			
			3254			
			3349			
	V35M	472,334	3153	3171		
			3197			
			3161			
			3176			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_M	V36M	497,58	4241	4255	3602	472
			4279			
			4249			
			4251			
NHL3,5_S	V14S	472,693	2491	2509	2524	50
			2516			
			2499			
			2531			
	V15S	475,005	2536	2587		
			2611			
			2583			
			2618			
	V16S	476,955	2491	2477		
			2481			
			2475			
			2461			
NHL3,5_2,5Mk_S	V24S	476,571	2319	2339	2366	86
			2341			
			2377			
			2321			
	V25S	475,771	2256	2284		
			2309			
			2273			
			2298			
	V26S	475,395	2454	2476		
			2528			
			2416			
			2507			
NHL3,5_5Mk_S	V34S	460,149	Provete partido		1766	88

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_S	V35S	469,921	1935	1845	1766	88
			1812			
			1798			
			1837			
	V36S	469,639	1681	1687		
			1704			
			1671			
			1693			
NHL3,5_H	V14H	471,477	4699	4690	4752	166
			4706			
			4680			
			4675			
	V15H	488,148	4645	4590		
			4552			
			4589			
			4577			
	V16H	487,962	4937	4977		
			5010			
			4961			
			5003			
NHL3,5_2,5Mk_H	V24H	473,891	4899	4886	5100	154
			4862			
			4886			
			4900			
	V25H	476,633	5280	5204		
			5146			
			5181			
			5209			
	V26H	469,82	5203	5210		
			5199			
			5228			
			5210			
NHL3,5_5Mk_H	V34H	478,35	4053	4109	4070	289
			4138			
			4085			
			4160			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_H	V35H	470,159	4440	4384	4070	289
			4316			
			4375			
			4407			
	V36H	470,857	3456	3718		
			3818			
			3773			
			3827			

Quadro IV.5 – Módulo de elasticidade dinâmico, 180 dias

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V17M	478,264	4441	4420	4461	43,235
			4388			
			4414			
			4440			
	V18M	477,198	4507	4501		
			4494			
			4504			
			4500			
	V19M	Provete partido				
NHL3,5_2,5Mk_M	V27M	478	3268	3362	3494	224
			3398			
			3401			
			3384			
	V28M	478,891	3400	3697		
			3412			
			3986			
			3990			
	V29M	475,699	3424	3425		
			3439			
			3427			
			3410			
NHL3,5_5Mk_M	V37M	471,725	2605	2606	2843	371
			2614			
			2597			
			2608			
	V38M	495,032	3480	3362		
			3258			
			3309			
			3403			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_M	V39M	465,952	2570	2560	2843	371
			2553			
			2568			
			2551			
NHL3,5_S	V17S	478,321	2631	2617	2480	172
			2638			
			2612			
			2589			
	V18S	473,18	2717	2565		
			2647			
			2444			
			2452			
	V19S	473,325	2267	2260		
			2251			
			2257			
			2265			
NHL3,5_2,5Mk_S	V27S	472,836	2316	2311	2145	576
			2301			
			2310			
			2318			
	V28S	481,407	234	1814		
			2352			
			2336			
			2334			
	V29S	475,435	2310	2311		
			2321			
			2308			
			2305			
NHL3,5_5Mk_S	V37S	462,709	1656	1619	1735	131
			1575			
			1630			
			1616			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_S	V38S	477,383	1913	1916	1735	131
			1910			
			1926			
			1917			
	V39S	470,332	1655	1669		
			1690			
			1673			
			1661			
NHL3,5_H	V17H	472,842	4285	4313	4095	196
			4320			
			4341			
			4307			
	V18H	472,496	4085	4134		
			4166			
			4143			
			4143			
	V19H	479,065	3827	3839		
			3858			
			3835			
			3837			
NHL3,5_2,5Mk_H	V27H	482,153	4093	4056	3727	341
			4069			
			4043			
			4019			
	V28H	487,414	3529	3399		
			3532			
			3266			
			3271			
	V29H	480,371	3111	3093		
			3072			
			3106			
			3086			
NHL3,5_5Mk_H	V37H	474,22	3162	3094	2937	226
			3010			
			3118			
			3086			

	Provete	Massa (g)	E (Mpa) Dinâmico	Média	Média	Desv.Pad
NHL3,5_5Mk_H	V38H	474,22	2959	2956	2937	226
			2966			
			2945			
			2957			
	V39H	473,767	2613	2617		
			2636			
			2601			
			2618			

Quadro IV.6 – Resistências mecânicas, 28 dias

Argamassa	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V11M	208,67	0,49	0,47	0,02	1409,08	0,88	0,81	0,05
	V12M	197,74	0,46			1238,59	0,77		
	V13M	191,99	0,45			1256,92	0,79		
NHL3,5_2,5Mk_M	V21M	153,3	0,36	0,33	0,03	2310,53	1,44	1,51	0,28
	V22M	121,11	0,28			3009,32	1,88		
	V23M	149,05	0,35			1940,38	1,21		
NHL3,5_5Mk_M	V31M	145,28	0,34	0,37	0,03	1987,38	1,24	1,44	0,14
	V32M	179,67	0,42			2437,19	1,52		
	V33M	154,28	0,36			2464,85	1,54		
NHL3,5_S	V11S	146,81	0,34	0,32	0,04	1090,10	0,68	0,61	0,07
	V12S	151,83	0,36			812,12	0,51		
	V13S	112,61	0,26			1009,94	0,63		
NHL3,5_2,5Mk_S	V21S	66,85	0,16	0,22	0,07	1459,91	0,91	1,00	0,13
	V22S	80,45	0,19			1453,91	0,91		
	V23S	131,3	0,31			1882,22	1,18		
NHL3,5_5Mk_S	V11H	116,29	0,27	0,26	0,06	1995,59	1,25	1,27	0,02
	V12H	80,13	0,19			2066,86	1,29		
	V13H	141,71	0,33			2032,07	1,27		

Argamassa	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_H	V11H	257,2	0,60	0,51	0,07	1125,19	0,70	0,90	0,14
	V12H	194,62	0,46			1631,94	1,02		
	V13H	195,87	0,46			1547,20	0,97		
NHL3,5_2,5Mk_H	V21H	157,87	0,37	0,47	0,10	1929,93	1,21	1,24	0,09
	V22H	257,69	0,60			2199,02	1,37		
	V23H	185,63	0,44			1844,35	1,15		
NHL3,5_5Mk_H	V31H	170,5	0,40	0,51	0,10	2617,67	1,64	1,69	0,08
	V32H	271,65	0,64			2617,95	1,64		
	V33H	210,48	0,49			2880,87	1,80		

Quadro IV.7 – Resistências mecânicas, 90 dias

Argamassa	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V14M	329,27	0,77	0,73	0,05	1843,13	1,15	1,07	0,07
	V15M	290,70	0,68			1722,36	1,08		
	V16M	Provete Partido				1585,63	0,99		
NHL3,5_2,5Mk_M	V24M	244,32	0,57	0,53	0,08	1329,53	0,83	0,93	0,08
	V25M	178,45	0,42			1495,68	0,93		
	V26M	252,43	0,59			1639,98	1,02		
NHL3,5_5Mk_M	V34M	198,43	0,47	0,50	0,06	2282,19	1,43	1,62	0,14
	V35M	193,07	0,45			2667,74	1,67		
	V36M	252,00	0,59			2826,89	1,77		
NHL3,5_S	V14S	87,08	0,20	0,24	0,04	840,87	0,53	0,55	0,04
	V15S	95,08	0,22			813,97	0,51		
	V16S	128,20	0,30			971,44	0,61		
NHL3,5_2,5Mk_S	V24S	110,26	0,26	0,29	0,02	792,67	0,50	0,84	0,26
	V25S	128,14	0,30			1439,36	0,90		
	V26S	134,94	0,32			1789,89	1,12		
NHL3,5_5Mk_S	V34S	116,57	0,27	0,26	0,02		-	0,80	0,32
	V35S	98,14	0,23			1786,53	1,12		
	V36S	115,63	0,27			770,26	0,48		

Argamassa	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_H	V14H	318,43	0,75	0,67	0,06	2299,56	1,44	1,34	0,08
	V15H	277,37	0,65			2148,54	1,34		
	V16H	261,85	0,61			1975,66	1,23		
NHL3,5_2,5Mk_H	V24H	251,71	0,59	0,67	0,06	2345,80	1,47	1,46	0,19
	V25H	306,87	0,72			2715,38	1,70		
	V26H	298,67	0,70			1955,77	1,22		
NHL3,5_5Mk_H	V34H	233,48	0,55	0,44	0,08	1750,66	1,09	1,20	0,16
	V35H	180,56	0,42			1710,59	1,07		
	V36H	154,37	0,36			2288,92	1,43		

Quadro IV.8 – Resistências mecânicas, 180 dias

Argamassas	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_M	V17M	205,61	0,48	0,49	0,01	2065,48	1,29	1,30	0,01
	V18M	216,03	0,51			2099,96	1,31		
	V19M	204,89	0,48			2092,39	1,31		
NHL3,5_2,5Mk_M	V27M	108,07	0,25	0,39	0,11	2141,45	1,34	1,33	0,00
	V28M	224,29	0,53			2130,52	1,33		
	V29M	165,18	0,39			2125,47	1,33		
NHL3,5_5Mk_M	V37M	310,07	0,73	0,71	0,06	4072,65	2,55	2,66	0,08
	V38M	327,93	0,77			4391,95	2,74		
	V39M	271,18	0,64			4294,67	2,68		
NHL3,5_S	V17S	83,63	0,20	0,22	0,02	13741,83	8,59	7,63	1,08
	V18S	109,09	0,26			13106,60	8,19		
	V19S	94,43	0,22			9790,00	6,12		
NHL3,5_2,5Mk_S	V27S	101,96	0,24	0,24	0,03	12896,07	8,06	7,47	0,48
	V28S	117,93	0,28			11938,46	7,46		
	V29S	91,75	0,22			11023,74	6,89		
NHL3,5_5Mk_S	V37S	324,26	0,76	0,68	0,09	9830,09	6,14	6,22	0,08
	V38S	304,38	0,71			10117,99	6,32		
	V39S	235,62	0,55			9884,47	6,18		

Argamassas	Provete	Flexão (N)	Resistência à tracção (Mpa)	Média	Desv.Pad	Compressão (N)	Resistência à compressão (MPa)	Média	Desv.Pad
NHL3,5_H	V17H	241,04	0,56	0,48	0,10	4244,77	2,65	2,73	0,06
	V18H	146,21	0,34			4472,40	2,80		
	V19H	224,11	0,53			4375,97	2,73		
NHL3,5_2,5Mk_H	V27H	184,88	0,43	0,39	0,03	6115,42	3,82	4,21	0,28
	V28H	161,29	0,38			7075,28	4,42		
	V29H	149,91	0,35			7040,51	4,40		
NHL3,5_5Mk_H	V37H	112,9	0,26	0,25	0,06	8065,41	5,04	4,73	0,50
	V38H	137,22	0,32			6451,26	4,03		
	V39H	71,5	0,17			8196,04	5,12		

Quadro IV.9 – Absorção de água por capilaridade, 28 dias

Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V11M	V12M	V13M	V21M	V22M	V23M	V31M	V32M	V33M	V11S	V12S	V13S	V21S	V22S	V23S	V31S	V32S	V33S
0	239,920	227,612	227,776	261,606	238,116	230,530	229,070	227,107	219,387	250,006	235,672	213,103	221,891	243,093	233,912	233,030	201,229	219,780
5'	245,639	238,118	236,223	270,297	247,192	236,021	241,595	240,915	234,281	266,497	249,506	227,617	236,512	258,797	248,991	246,579	214,677	233,611
10'	249,460	243,092	240,694	275,192	251,283	238,864	246,090	245,252	239,085	271,185	253,017	231,702	242,048	264,380	254,728	251,921	220,374	239,125
15'	253,152	246,823	244,044	278,675	254,134	241,150	249,062	249,392	242,630	274,632	255,812	235,275	246,131	268,566	259,093	255,710	224,135	242,806
30'	261,103	254,101	251,187	286,431	260,496	247,601	256,326	257,456	250,897	283,004	263,388	242,312	254,629	277,690	267,410	263,999	231,123	250,840
1	272,107	258,956	259,594	297,424	269,866	258,104	262,700	261,843	254,448	286,061	268,718	242,769	255,125	278,686	267,804	268,065	231,476	252,488
2	273,310	259,103	260,107	303,432	274,763	266,544	262,890	262,154	254,905	286,112	268,904	242,833	255,423	279,054	267,913	268,407	231,786	252,928
3	273,519	259,361	260,309	303,590	275,007	266,916	263,122	262,188	254,991	286,241	269,072	242,932	255,474	279,197	267,874	268,532	231,929	253,003
4	273,693	259,495	260,459	303,735	275,281	266,974	263,190	262,356	255,134	286,390	269,342	243,069	255,711	279,264	268,149	268,668	232,090	253,301
24	274,191	259,928	260,834	304,556	275,803	267,633	263,561	262,739	255,354	286,868	269,652	243,383	256,022	279,716	268,683	269,061	232,439	253,580
96	274,681	260,562	261,183	304,985	276,068	268,064	263,996	262,864	255,651	287,368	269,976	243,678	256,489	280,269	269,401	269,561	233,084	253,993
Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V11H	V12H	V13H	V21H	V22H	V23H	V31H	V32H	V33H									
0	238,785	233,255	225,798	270,958	246,299	258,034	232,097	238,199	213,450									
5'	248,033	242,640	234,585	284,312	254,809	266,903	244,191	250,594	223,549									
10'	253,577	248,137	240,112	290,136	260,370	272,610	248,267	255,712	228,908									
15'	257,159	251,759	244,025	293,458	263,907	275,736	252,724	258,989	231,963									
30'	264,849	260,907	252,702	301,716	272,013	283,841	260,739	266,194	238,945									
1	271,722	267,651	257,985	311,392	282,122	295,123	266,824	273,380	245,950									
2	272,134	267,976	258,471	312,010	283,067	297,371	267,152	273,944	246,377									
3	272,341	268,102	258,658	312,144	283,325	297,518	267,250	274,090	246,667									
4	272,487	268,202	258,738	312,329	283,456	297,655	267,469	274,260	246,861									
24	272,796	268,532	259,186	312,844	283,732	298,206	267,901	274,678	247,249									
96	273,259	268,933	259,519	313,297	283,640	298,735	268,397	275,416	247,711									

Quadro IV.10 – Absorção de água por capilaridade, 90 dias

Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V14M	V15M	V16M	V24M	V25M	V26M	V34M	V35M	V36M	V14S	V15S	V16S	V24S	V25S	V26S	V34S	V35S	V36S
0	220,958	235,516	208,416	226,480	237,259	224,485	222,130	234,128	240,891	197,620	234,895	226,755	224,869	217,254	223,563	207,697	231,502	234,062
5'	233,161	249,185	222,372	239,970	249,424	236,565	235,703	247,984	253,343	213,272	246,452	240,112	238,342	230,762	237,487	220,999	245,515	248,996
10'	237,132	253,641	227,584	244,846	253,821	240,922	239,714	252,185	257,305	218,430	251,796	244,982	243,730	235,907	242,998	226,013	250,575	254,409
15'	239,970	256,984	230,980	248,305	256,849	244,230	242,978	255,603	260,769	222,452	256,026	249,049	247,903	239,537	247,557	229,859	254,516	258,477
30'	246,205	263,701	234,743	256,287	263,470	251,391	249,690	263,256	267,523	224,464	264,348	256,670	255,978	247,093	254,169	237,159	262,692	267,416
1	250,101	265,796	234,923	259,204	270,761	256,120	253,712	268,239	273,899	224,358	265,103	256,145	256,379	247,391	254,452	237,426	264,220	267,897
2	250,354	265,943	235,026	259,373	271,087	256,341	253,824	268,414	274,168	224,518	265,141	257,255	256,363	247,683	254,499	237,489	264,297	268,106
3	250,407	266,029	235,134	259,517	271,207	256,430	253,962	268,551	274,249	224,465	265,357	257,412	256,570	247,666	254,785	237,486	264,451	268,177
4	251,056	266,525	235,734	260,216	271,738	256,402	254,549	269,273	274,896	224,915	265,648	257,756	257,140	248,294	255,208	238,256	264,792	268,638
24	251,845	267,454	236,538	261,020	272,563	257,175	255,486	270,198	275,706	225,403	266,058	258,204	257,576	248,575	255,480	238,411	265,103	268,987
96	251,946	267,691	236,737	261,230	272,766	257,343	255,667	270,324	275,879	225,589	266,148	258,389	257,652	248,631	255,581	238,517	265,219	269,165
Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V14H	V15H	V16H	V24H	V25H	V26H	V34H	V35H	V36H									
0	236,919	241,529	260,571	214,132	206,549	195,160	211,417	210,874	200,636									
5'	243,697	248,318	267,288	219,870	212,639	201,533	220,883	219,197	209,981									
10'	247,890	251,884	271,341	223,418	216,260	205,122	224,289	222,778	213,588									
15'	251,874	255,345	275,266	226,668	219,250	208,348	227,142	224,621	216,340									
30'	260,200	263,562	283,455	233,465	226,460	215,132	233,190	230,095	222,283									
1	270,186	273,212	293,218	242,049	234,913	223,038	242,384	238,692	228,731									
2	270,737	275,583	296,450	244,668	235,387	223,549	242,610	240,297	229,009									
3	270,859	275,642	296,573	244,798	236,364	223,761	242,878	240,346	229,084									
4	271,299	276,054	297,145	245,341	236,944	224,208	243,440	240,871	229,603									
24	271,759	276,500	297,533	245,831	237,286	224,545	243,761	241,247	229,991									
96	271,785	276,563	297,598	245,874	237,322	224,591	243,861	241,350	230,062									

Quadro IV.11 – Absorção de água por capilaridade, 180 dias

Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V17M	V18M	V19M	V27M	V28M	V29M	V37M	V38M	V39M	V17S	V18S	V19S	V27S	V28S	V29S	V37S	V38S	V39S
0	243,708	233,373	232,359	234,646	238,348	232,430	232,840	234,593	224,224	241,175	243,740	263,620	232,670	220,163	242,042	232,370	229,741	236,016
5'	258,193	245,313	237,116	249,349	251,940	246,632	247,982	248,193	239,716	255,253	256,549	277,144	246,037	233,554	255,716	245,876	243,748	249,180
10'	262,869	249,670	242,385	255,446	257,789	252,162	252,167	253,358	244,520	261,323	261,756	282,262	251,178	238,906	260,622	251,023	248,846	254,197
15'	266,133	252,753	245,916	259,256	261,610	255,560	256,520	256,783	247,814	265,836	265,763	286,702	255,382	243,327	265,131	255,348	253,390	258,520
30'	271,634	258,376	251,157	266,317	268,780	262,181	262,816	263,351	254,348	273,516	273,001	294,632	263,297	250,024	273,182	263,373	261,741	266,508
1	275,385	263,157	251,316	267,690	271,111	264,843	266,957	267,127	256,469	274,140	274,809	297,802	264,237	250,233	275,000	264,196	262,892	268,191
2	275,474	263,371	251,502	267,998	272,036	265,016	267,179	267,306	256,576	274,196	274,973	297,960	264,363	250,359	275,205	265,249	262,980	268,286
3	275,498	263,345	251,548	272,245	272,245	265,183	267,277	267,406	256,788	274,469	274,030	298,031	264,558	250,583	274,411	265,524	263,195	260,388
72	277,410	265,375	253,700	270,049	273,843	266,991	269,167	269,157	258,480	275,520	276,151	299,530	265,530	251,550	276,410	266,952	263,952	269,384
96	277,565	265,569	253,796	270,248	273,865	267,187	269,447	269,363	258,702	275,850	276,554	299,797	265,551	251,592	276,530	266,860	264,227	269,618
Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V17H	V18H	V19H	V27H	V28H	V29H	V37H	V38H	V39H									
0	228,914	245,480	240,463	229,331	214,349	177,578	238,098	247,292	199,028									
5'	233,867	252,280	250,688	238,324	222,879	188,703	249,836	258,344	212,984									
10'	237,674	256,276	255,156	242,789	227,794	193,770	254,393	262,840	218,186									
15'	241,001	260,013	259,296	246,245	231,562	197,861	257,872	266,222	222,070									
30'	247,959	266,705	266,414	253,407	238,702	202,937	264,270	272,825	227,804									
1	259,154	278,034	272,179	260,604	244,060	203,169	272,202	282,972	228,064									
2	260,390	279,339	272,404	260,766	244,210	203,235	272,429	283,310	228,234									
3	260,602	279,493	272,566	261,084	244,394	203,430	272,546	283,440	228,325									
72	261,545	280,659	273,822	262,156	245,411	204,582	273,724	284,816	229,520									
96	261,659	280,851	274,135	262,225	245,480	204,655	273,986	284,904	229,615									

Quadro IV.12 – Secagem, 28 dias

Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V11M	V12M	V13M	V21M	V22M	V23M	V31M	V32M	V33M	V11S	V12S	V13S	V21S	V22S	V23S	V31S	V32S	V33S
0:00	274,681	260,562	261,183	304,985	276,068	268,064	263,996	262,864	255,651	287,368	269,976	243,678	256,489	280,269	269,401	269,561	233,084	253,993
1:00	273,879	259,740	260,525	303,921	275,346	267,521	263,269	262,282	254,941	286,576	269,378	243,068	255,856	279,698	268,577	269,034	232,248	253,215
2:00	273,626	259,454	260,261	303,561	274,961	267,274	263,070	261,950	254,633	286,198	269,080	242,837	255,521	279,524	268,230	268,807	231,914	252,961
3:00	273,342	259,236	259,968	303,164	274,677	267,043	262,818	261,781	254,371	285,917	268,897	242,571	255,315	279,329	267,955	268,554	231,553	252,684
4:00	272,845	258,935	259,587	302,728	274,333	266,735	262,534	261,522	254,019	285,518	268,640	242,283	255,137	279,112	267,678	268,301	231,238	252,420
5:00	272,813	258,731	259,321	302,411	274,076	266,514	262,329	261,310	253,743	285,245	268,444	242,057	254,892	278,835	267,338	268,007	230,894	252,111
23:50	268,566	254,988	254,341	296,562	268,982	262,519	258,015	257,534	249,043	279,075	265,120	237,617	251,231	274,768	262,772	263,245	225,739	247,182
51:05	263,836	250,885	249,393	290,911	263,952	258,377	253,113	253,325	243,943	274,099	261,460	232,951	247,557	270,663	258,272	258,343	220,603	242,085
72:10	259,893	247,293	245,312	286,214	259,671	254,715	248,984	249,761	239,526	269,262	257,988	228,903	243,482	266,290	253,445	253,157	215,400	236,714
144:40	252,118	239,087	237,918	276,009	250,680	246,218	240,366	241,077	229,647	260,937	249,096	221,872	240,278	262,642	249,461	248,886	211,710	232,653
167:20	250,669	237,258	236,766	274,128	248,047	244,308	238,668	239,076	227,951	259,680	247,268	220,967	231,958	254,086	241,844	241,227	207,845	227,240
192:20	249,726	236,063	235,892	272,824	247,899	242,980	237,447	237,730	226,850	258,879	246,117	220,343	230,418	252,640	240,720	240,987	206,845	226,441
215:00	248,915	234,900	235,118	271,673	246,856	241,678	236,442	236,621	225,959	258,134	245,167	219,744	229,258	251,613	239,865	240,026	205,464	225,711
239:00	248,308	234,392	234,515	270,771	246,102	240,793	235,773	235,773	225,367	257,551	244,448	219,277	228,507	250,897	239,281	239,410	205,095	225,228
309:20	246,868	232,648	233,045	268,913	244,518	238,646	233,822	233,822	224,092	256,173	242,803	217,947	227,840	250,297	238,282	238,889	204,752	224,792
333:20	246,431	232,220	232,640	268,439	244,148	238,059	233,322	233,332	223,783	255,822	242,263	217,625	226,259	248,584	237,470	238,615	203,864	223,699
357:30	246,075	231,856	232,224	268,018	243,777	237,549	232,923	232,923	223,492	255,462	241,965	217,321	225,861	248,140	237,102	237,674	203,609	223,401
381:10	245,823	231,586	231,928	267,718	243,529	237,166	232,634	232,634	223,286	255,230	241,685	217,113	225,527	247,743	236,809	236,999	203,395	223,199
406:40	245,560	231,340	231,649	267,464	243,298	236,899	232,267	232,267	223,089	255,010	241,412	216,899	225,252	247,417	236,530	236,731	203,203	222,924
479:30	244,765	230,519	230,779	266,634	242,547	235,883	231,568	231,568	222,485	254,299	240,515	216,179	224,970	247,109	236,251	236,475	203,007	222,683

Tempo	Massa dos provetes (g)								
h	V11H	V12H	V13H	V21H	V22H	V23H	V31H	V32H	V33H
0:00	273,259	268,933	259,519	313,297	283,640	298,735	268,397	275,416	247,711
1:00	272,650	268,182	258,977	312,752	283,464	298,140	267,880	274,475	247,172
2:00	272,405	267,948	258,622	312,518	283,356	297,699	267,530	274,475	246,875
3:00	272,179	267,725	258,460	312,274	283,090	297,343	267,212	273,693	246,576
4:00	271,934	267,463	258,270	312,030	282,876	296,979	266,885	273,331	246,297
5:00	271,618	267,119	257,971	311,717	282,593	296,576	266,473	272,926	245,957
23:50	266,502	262,004	253,761	307,109	278,351	289,920	259,878	267,584	241,282
51:05	261,406	257,024	249,425	302,470	273,836	284,161	253,611	263,503	235,577
72:10	256,408	252,177	245,286	297,952	269,156	278,702	247,936	258,366	231,309
144:40	252,769	248,588	242,257	294,088	265,518	274,827	244,880	255,110	228,182
167:20	247,685	241,981	235,740	285,515	258,122	268,973	240,745	249,035	223,317
192:20	246,586	240,980	234,356	283,878	256,468	267,867	239,821	247,784	222,422
215:00	245,795	240,177	233,312	282,681	255,324	266,995	239,079	246,776	221,626
239:00	245,278	239,670	232,677	281,754	254,587	266,421	238,597	246,170	221,066
309:20	244,789	239,211	232,104	281,014	254,050	265,912	238,205	245,648	220,493
333:20	243,549	237,990	230,635	279,194	252,680	264,559	237,182	244,328	219,111
357:30	243,175	237,595	230,262	278,671	252,090	264,186	236,878	243,970	218,753
381:10	242,844	237,348	229,932	278,243	251,874	263,858	236,865	243,643	218,653
406:40	242,624	237,109	229,648	277,836	251,649	263,573	236,347	243,377	218,182
479:30	242,339	236,804	229,359	277,429	251,330	263,267	236,099	243,062	217,916

Quadro IV.13 – Secagem, 90 dias

Tempo h	Massa dos provetes (g)																	
	V14M	V15M	V16M	V24M	V25M	V26M	V34M	V35M	V36M	V14S	V15S	V16S	V24S	V25S	V26S	V34S	V35S	V36S
0:00	252,247	268,402	237,332	261,858	273,376	258,540	256,210	270,700	276,399	287,368	269,976	258,944	257,881	248,800	255,885	238,836	265,565	269,699
1:00	251,557	267,686	236,504	260,953	272,722	257,711	255,277	269,975	275,748	286,576	269,378	258,186	257,052	248,023	255,081	238,153	264,861	269,069
2:00	251,001	267,240	235,979	260,405	272,713	257,115	254,533	269,344	275,356	286,198	269,080	257,536	256,382	247,341	254,366	237,461	264,270	268,695
3:00	250,580	267,065	235,790	260,166	271,105	256,864	252,250	268,100	275,177	285,917	268,897	257,256	256,072	247,056	254,060	237,158	264,996	268,515
4:00	250,106	266,387	235,006	259,246	271,468	255,905	253,148	268,207	274,521	285,518	268,640	256,304	255,049	246,041	253,053	236,213	263,087	267,408
5:00	249,886	266,144	234,733	258,919	271,245	255,575	252,768	267,892	274,276	285,245	268,444	255,947	254,674	245,691	252,693	235,871	262,761	267,668
23:50	245,951	262,501	230,525	253,886	267,768	250,517	246,571	262,608	270,504	279,075	265,120	250,110	248,392	239,536	246,832	229,717	256,956	263,876
51:05	236,781	253,254	220,565	242,709	259,611	240,019	234,890	250,860	261,498	274,099	261,460	235,247	233,757	225,140	232,377	215,734	242,636	253,487
72:10	233,881	250,356	217,895	239,676	256,829	236,890	232,179	247,436	258,764	269,262	257,988	232,616	231,551	222,679	229,671	213,356	239,419	249,288
144:40	228,422	243,881	213,244	233,793	249,611	231,102	227,758	241,542	252,108	260,937	249,096	229,336	228,314	219,664	226,388	210,284	235,091	241,512
167:20	227,214	242,239	212,208	232,444	247,607	229,910	226,827	240,289	250,279	259,680	247,268	228,607	227,559	219,009	225,671	209,563	234,200	239,813
192:20	226,514	241,248	211,553	231,613	246,252	229,186	226,250	239,527	249,102	258,879	246,117	228,190	227,062	218,604	225,243	209,157	233,679	238,886
215:00	225,766	240,219	210,879	230,739	244,871	228,425	225,593	238,724	247,844	258,134	245,167	227,800	226,583	218,253	224,815	208,769	233,100	237,880
239:00	225,210	239,445	210,395	229,069	243,757	227,859	225,111	238,098	246,887	257,551	244,448	227,628	226,204	218,114	224,538	208,559	232,720	237,188
309:20	224,012	237,895	209,618	228,742	241,606	226,759	224,127	236,760	245,043	256,173	242,803	227,556	225,702	218,079	224,376	208,458	232,365	235,832
333:20	223,683	237,531	209,507	228,425	241,045	226,456	223,902	236,463	244,558	255,822	242,263	227,562	225,692	218,084	224,388	208,458	232,354	235,505
357:30	223,384	237,231	209,443	228,174	240,548	226,247	223,728	236,190	244,107	255,462	241,965	227,572	225,612	218,103	224,384	208,456	232,352	235,256
381:10	223,123	237,007	209,412	227,984	240,128	226,072	223,576	235,950	243,706	255,230	241,685	227,529	225,648	218,044	224,346	208,404	232,312	235,085
406:40	222,943	236,891	209,402	227,895	239,865	226,012	223,525	235,826	243,460	255,010	241,412	227,514	225,635	218,033	224,335	208,400	232,310	235,053
479:30	222,646	236,760	209,397	227,802	239,451	225,927	223,451	235,657	243,040	254,299	240,515	227,562	225,672	218,068	224,375	208,420	232,337	235,051

Tempo	Massa dos provetes (g)								
h	V14H	V15H	V16H	V24H	V25H	V26H	V34H	V35H	V36H
0:00	271,863	276,751	297,792	246,002	237,430	224,728	244,160	241,660	230,274
1:00	271,304	276,001	297,018	245,313	236,832	223,919	243,444	240,932	229,475
2:00	270,870	275,506	296,366	244,724	236,186	223,239	242,439	240,367	229,054
3:00	270,687	275,286	296,079	244,458	235,929	222,940	242,702	240,120	228,824
4:00	269,984	274,514	295,088	243,644	235,086	222,908	241,949	239,270	227,998
5:00	269,723	274,237	294,739	243,332	234,780	221,544	241,641	238,950	227,688
23:50	265,890	269,608	288,835	237,821	229,645	215,531	236,837	233,565	222,512
51:05	255,273	257,732	274,930	225,198	218,132	203,985	224,303	221,508	210,995
72:10	251,474	254,361	272,070	222,885	215,936	202,176	221,964	219,418	208,131
144:40	245,250	249,146	267,736	219,565	212,223	199,360	217,927	215,764	205,642
167:20	243,909	247,915	266,655	218,715	211,311	198,660	216,800	214,874	204,796
192:20	242,080	247,141	265,968	218,212	210,731	198,202	216,123	214,328	204,248
215:00	242,169	246,294	265,202	217,653	209,110	197,737	215,408	213,729	203,649
239:00	241,462	245,632	264,590	217,203	209,618	197,377	214,847	213,272	203,210
309:20	239,996	244,286	263,354	216,269	209,620	196,764	213,724	212,432	202,346
333:20	239,637	243,958	263,057	216,060	208,408	196,656	213,455	212,276	202,154
357:30	239,333	243,700	262,819	215,891	208,251	196,583	213,240	212,175	202,033
381:10	239,056	243,472	262,600	215,740	208,112	196,513	213,042	212,071	201,906
406:40	238,940	243,389	262,503	215,711	208,091	196,508	212,987	212,063	201,889
479:30	238,774	243,278	262,402	215,670	208,056	196,508	212,925	212,061	201,874

Quadro IV.13 – Secagem, 180 dias

Tempo	Massa dos provetes (g)																	
h	V17M	V18M	V19M	V27M	V28M	V29M	V37M	V38M	V39M	V17S	V18S	V19S	V27S	V28S	V29S	V37S	V38S	V39S
0:00	277,565	265,569	253,796	270,248	273,865	267,187	269,447	269,363	258,702	275,850	276,554	299,797	265,551	251,592	276,530	266,860	264,227	269,618
1:00	277,038	265,040	253,330	269,828	273,354	266,769	268,890	268,700	258,162	275,396	275,932	299,234	264,930	251,030	275,841	266,261	263,720	269,216
3:00	276,800	264,820	252,050	269,563	273,036	266,475	268,544	268,340	257,903	275,120	275,675	298,915	264,525	250,680	275,366	265,872	263,413	268,964
4:00	276,514	264,534	252,800	269,275	272,631	266,177	268,153	267,869	257,637	274,830	275,366	298,470	264,048	250,273	274,960	265,481	263,035	268,680
5:00	276,207	264,275	252,562	269,038	272,276	265,906	267,827	267,475	257,325	274,565	275,070	298,075	263,590	249,920	274,300	265,085	262,691	268,477
8:00	275,906	263,982	252,302	268,774	271,906	265,600	267,500	266,066	257,020	274,290	274,780	297,665	263,132	249,562	273,795	264,693	262,343	268,245
26:50	270,280	258,140	247,110	263,612	264,560	259,855	261,300	259,473	250,945	268,497	267,838	289,045	253,580	242,237	262,705	256,172	254,320	263,335
54:05	265,630	253,163	242,818	259,075	258,601	255,199	256,359	253,636	245,670	263,097	261,536	281,200	244,768	234,254	252,085	247,914	246,518	258,400
75:30	261,527	248,694	238,778	254,654	253,478	250,731	252,010	248,977	240,792	256,400	255,032	273,811	239,252	227,428	248,032	241,950	240,111	253,664
171:00	252,348	240,030	229,998	245,350	244,481	241,306	242,485	240,939	231,363	245,903	247,526	266,044	235,121	222,420	244,263	235,872	233,592	241,966
195:00	251,012	238,838	228,749	243,690	243,452	239,806	240,887	239,866	230,212	244,912	246,768	266,340	234,597	221,931	243,800	235,235	232,857	240,900
216:30	250,096	238,007	227,845	242,460	242,734	238,823	239,764	239,187	229,387	244,267	246,287	265,845	234,249	221,566	243,469	234,758	232,272	240,155
314:30	247,354	235,796	225,225	239,163	240,739	236,229	236,999	237,147	226,983	242,734	245,088	264,800	233,592	220,975	243,025	233,552	231,105	238,438
340:45	246,846	235,400	224,740	238,558	240,400	235,720	236,400	236,750	226,554	242,450	244,920	264,723	233,553	220,948	243,075	233,415	230,958	238,082
362:45	246,467	235,110	224,409	238,115	240,200	235,365	235,955	236,484	226,262	242,407	244,860	264,720	233,560	220,965	243,031	233,315	230,883	237,817
386:00	246,105	234,863	224,115	237,723	240,060	235,053	235,596	236,283	225,015	242,293	244,795	264,677	233,530	220,942	243,010	233,236	230,810	237,567
410:30	245,752	234,628	223,849	237,340	239,951	234,741	235,241	235,105	225,802	242,205	244,779	264,684	233,542	220,948	243,020	233,220	230,798	237,369
480:00	245,158	234,341	223,500	236,543	239,872	234,158	234,561	235,919	225,554	242,191	244,731	264,668	233,523	220,930	243,000	233,177	230,760	237,049

Tempo	Massa dos provetes (g)								
h	V17H	V18H	V19H	V27H	V28H	V29H	V37H	V38H	V39H
0:00	261,659	280,851	274,135	262,225	245,480	204,655	273,986	284,904	229,615
1:00	261,183	280,340	273,637	261,713	244,966	204,062	273,450	284,446	229,043
3:00	261,009	280,117	273,370	261,438	244,650	203,800	273,050	284,156	228,825
4:00	260,757	279,796	273,000	261,074	244,265	203,480	272,630	283,842	228,580
5:00	260,510	279,690	272,690	260,766	243,923	203,198	272,250	283,520	228,330
8:00	260,207	279,234	272,282	260,455	243,580	202,934	271,880	283,220	228,086
26:50	254,257	272,943	265,600	253,550	236,310	197,450	263,875	276,740	222,480
54:05	248,375	266,484	258,700	246,960	229,505	191,758	256,269	270,123	217,217
75:30	242,338	260,854	251,983	241,044	224,294	186,471	249,643	263,635	211,750
171:00	234,645	251,997	244,973	234,490	218,470	180,940	242,768	254,444	203,025
195:00	233,787	251,079	244,160	233,646	217,761	180,310	242,044	253,522	202,191
216:30	233,142	250,411	243,586	233,078	217,243	179,897	241,215	252,858	201,581
314:30	231,380	248,603	242,042	231,564	216,007	178,880	240,163	250,804	200,128
340:45	231,095	248,270	241,800	231,275	215,880	178,720	331,900	250,444	199,999
362:45	230,886	248,024	241,684	230,094	215,747	178,655	239,742	250,161	199,011
386:00	230,708	247,782	241,603	230,950	215,677	178,660	239,558	249,854	199,955
410:30	230,541	247,548	241,528	230,805	215,635	178,563	239,422	249,600	199,945
480:00	230,316	247,145	241,145	230,629	215,547	178,519	239,261	249,034	199,875

Quadro IV.14 – Condutibilidade térmica de provetes prismáticos aos 28, 90 e 180 dias

Argamassa	28 dias			90 dias			180 dias		
	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)
NHL_M	V11M	0,776	0,763	V14M	0,802	0,933	V17M	0,970	0,802
		0,795			0,956			0,987	
	V12M	0,731		V15M	0,931		V18M	0,713	
		0,76			0,991			0,779	
	V13M	0,755		V16M	0,954		V19M	0,695	
		0,759			0,962			0,665	
NHL_2,5Mk_M	V21M	0,78	0,785	V24M	0,864	0,875	V27M	0,750	0,786
		0,749			0,888			0,774	
	V22M	0,757		V25M	0,876		V28M	0,873	
		0,753			0,892			0,779	
	V23M	0,835		V26M	0,893		V29M	0,779	
		0,835			0,839			0,759	
NHL3,5_5Mk_M	V31M	0,803	0,776	V34M	0,983	0,890	V37M	0,758	0,824
		0,773			0,841			0,728	
	V32M	0,858		V35M	0,871		V38M	0,882	
		0,746			0,891			0,870	
	V33M	0,754		V36M	0,842		V39M	0,895	
		0,721			0,91			0,813	
NHL3,5_S	V11S	0,74	0,742	V14S	0,605	0,696	V17S	0,771	0,754
		0,758			0,671			0,715	
	V12S	0,773		V15S	0,666		V18S	0,755	
		0,801			0,686			0,779	
	V13S	0,644		V16S	0,794		V19S	0,805	
		0,738			0,752			0,701	
NHL3,5_2,5Mk_S	V21S	0,717	0,680	V24S	0,784	0,819	V27S	0,709	0,812
		0,669			0,782			0,785	
	V22S	0,723		V25S	0,827		V28S	0,880	
		0,706			0,853			0,826	
	V23S	0,721		V26S	0,8		V29S	0,853	
		0,541			0,868			0,819	
NHL3,5_5Mk_S	V31S	0,71	0,708	V34S	0,829	0,869	V37S	0,792	0,691
		0,715			0,853			0,778	
	V32S	0,676		V35S	0,832		V38S	0,773	
		0,648			0,952			0,724	
	V33S	0,77		V36S	0,855		V39S	0,571	
		0,729			0,891			0,505	
NHL3,5_H	V11H	0,807	0,771	V14H	0,895	0,878	V17H	1,070	0,905
		0,733			0,841			0,904	
	V12H	0,76		V15H	0,906		V18H	0,992	
		0,75			0,842			1,008	

Argamassas	28 dias			90 dias			180 dias		
	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)	Provete	λ (w/m.K)	λ média (w/m.K)
NHL3,5_H	V13H	0,8		V16H	0,877		V19H	0,665	
		0,776			0,907			0,789	
NHL3,5_2,5Mk_H	V21H	0,857	0,812	V24H	0,872	0,824	V27H	0,780	0,777
		0,75			0,86			0,714	
	V22H	0,8		V25H	0,811		V28H	0,871	
		0,808			0,819			0,753	
	V23H	0,802		V26H	0,781		V29H	0,779	
		0,854			0,802			0,765	
NHL3,5_5Mk_H	V31H	0,8	0,776	V34H	0,754	0,786	V37H	0,699	0,744
		0,789			0,786			0,715	
	V32H	0,735		V35H	0,759		V38H	0,785	
		0,727			0,791			0,733	
	V33H	0,795		V36H	0,836		V39H	0,744	
		0,811			0,788			0,788	

Quadro IV.15 – Variações de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, 28 dias

Ciclos	Massa [g]								
	NHL3,5_M	NHL3,5_2,5Mk_M	NHL3,5_5Mk_M	NHL3,5_S	NHL3,5_2,5Mk_S	NHL3,5_5Mk_S	NHL3,5_H	NHL3,5_2,5Mk_H	NHL3,5_5Mk_H
0	230,11267	242,727	224,609	232,515	231,946	217,326	232,157	257,832	227,114
1	232,60067	243,657	225,452	233,557	232,724	218,051	232,986	258,777	227,779
2	233,53733	244,782	226,477	234,468	233,663	218,972	233,927	259,910	228,787
3	234,28433	245,741	227,348	235,137	234,388	219,687	234,626	260,903	229,555
4	234,65	246,290	228,004	235,523	234,757	220,048	234,918	261,14	229,890
5	235,21133	246,841	228,735	235,959	234,838	220,535	235,430	261,220	230,387
6	234,499	229,050	228,949	236,313	162,477	220,353	234,906	250,902	229,002
7	234,75833	213,315	228,966	236,222	78,279	220,063	234,906	232,522	228,156
8	230,70567	155,496	223,715	232,730	34,310	216,177	228,540	181,401	218,762
9	226,41	140,054	216,455	219,490	32,583	162,825	212,731	137,644	178,244
10	226,16	80,631	160,002	189,008	-	82,256	185,806	110,166	136,514
11	219,98467	69,310	138,650	182,942	-	58,878	178,131	88,388	127,059
12	214,417	54,879	75,957	156,978	-	30,203	146,036	75,397	88,158
13	205,010	12,103	48,851	87,512	-	16,465	121,923	53,698	58,984
14	194,359	-	16,152	83,970	-	-	97,117	42,069	40,580
15	164,498	-	-	77,551	-	-	54,701	37,359	20,170
16	153,928	-	-	73,617	-	-	9,603	18,809	-
17	140,257	-	-	67,231	-	-	-	-	-
18	102,212	-	-	39,021	-	-	-	-	-
19	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro IV.15 – Variações de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, 90 dias

Ciclos	Massa [g]								
	NHL3,5_M	NHL3,5_2,5Mk_M	NHL3,5_5Mk_M	NHL3,5_S	NHL3,5_2,5Mk_S	NHL3,5_5Mk_S	NHL3,5_H	NHL3,5_2,5Mk_H	NHL3,5_5Mk_H
0	221,050	228,758	231,710	219,258	221,361	223,555	246,026	204,887	207,059
1	221,918	229,730	232,653	220,140	222,253	224,344	247,249	205,851	208,010
2	222,581	230,600	233,567	220,842	223,041	225,084	248,194	206,644	208,848
3	223,247	231,353	234,127	221,319	223,638	225,681	249,011	207,367	209,395
4	223,759	232,003	235,014	221,661	224,178	226,248	249,706	207,936	210,012
5	224,193	232,701	235,667	221,927	224,456	226,599	250,485	207,343	175,320
6	224,448	233,043	236,131	222,018	224,553	226,505	250,401	142,687	145,090
7	224,144	233,146	236,029	222,001	224,524	226,381	249,942	90,450	29,183
8	224,613	233,577	238,043	222,116	224,701	226,691	238,229	20,453	0,000
9	224,229	233,715	236,335	222,434	224,861	226,713	150,886	18,164	0,000
10	223,757	233,449	235,858	222,563	224,937	226,213	88,476	0,000	0,000
11	223,318	232,765	234,906	222,251	224,418	225,393	0,000	0,000	0,000
12	223,389	213,053	234,482	222,438	224,611	225,236	0,000	0,000	0,000
13	223,174	197,862	233,290	222,319	224,008	224,765	0,000	0,000	0,000
14	223,416	189,429	233,810	222,758	224,350	224,009	0,000	0,000	0,000
15	222,517	177,895	232,473	222,616	223,650	223,043	0,000	0,000	0,000
16	221,917	174,451	230,607	222,296	222,792	221,748	0,000	0,000	0,000
17	221,363	160,319	210,373	222,182	222,126	220,545	0,000	0,000	0,000
18	221,333	134,295	209,768	222,199	221,860	220,006	0,000	0,000	0,000
19	221,007	133,137	209,103	222,014	220,934	219,028	0,000	0,000	0,000
20	220,808	99,599	172,426	221,982	219,330	214,814	0,000	0,000	0,000

Quadro IV.16 – Variações de massa das argamassas no ensaio de resistência aos sulfatos, 180 dias

Ciclos	Massa [g]								
	NHL3,5_M	NHL3,5_2,5Mk_M	NHL3,5_5Mk_M	NHL3,5_S	NHL3,5_2,5Mk_S	NHL3,5_5Mk_S	NHL3,5_H	NHL3,5_2,5Mk_H	NHL3,5_5Mk_H
0	232,013	234,422	229,638	248,883	231,038	231,693	237,766	206,743	226,711
1	232,479	234,988	230,140	249,467	231,669	232,162	238,587	207,373	227,258
2	233,135	236,589	231,007	250,368	234,840	233,441	239,397	208,105	227,996
3	233,943	236,905	231,935	251,148	233,335	233,710	240,111	208,841	228,935
4	232,881	236,392	230,837	250,222	232,473	232,545	238,701	208,233	227,935
5	229,865	232,120	227,003	250,950	229,711	229,885	235,880	205,624	224,937
6	227,259	230,885	226,318	247,001	228,417	228,565	234,845	204,258	223,648
7	226,691	231,698	225,097	246,809	227,742	225,693	234,618	203,114	222,779
8	224,307	227,024	222,766	246,135	225,050	223,068	234,081	200,933	221,418
9	218,883	223,195	214,961	245,044	220,875	217,019	233,955	199,479	217,344
10	211,779	220,906	211,736	243,314	218,337	214,456	233,202	198,383	216,771
11	208,509	220,394	211,324	242,069	215,801	209,993	232,981	197,998	216,246
12	168,477	209,468	198,002	230,983	203,692	196,143	220,712	192,250	204,795
13	163,578	207,068	194,566	227,610	199,006	197,995	215,600	190,621	197,353
14	112,264	201,315	189,294	225,381	194,296	195,603	213,855	189,796	189,642
15	111,513	199,765	186,215	217,578	180,735	188,290	206,693	187,387	181,874
16	106,771	195,143	176,292	211,377	169,515	184,250	203,513	182,265	173,716
17	100,307	193,522	173,817	209,578	162,252	180,285	201,500	180,034	170,529
18	84,750	190,491	171,170	207,985	157,382	176,547	200,294	178,423	166,806
19	76,786	186,656	168,901	207,100	148,675	132,876	197,900	177,387	161,704
20	74,886	171,729	166,886	205,937	96,217	55,315	184,170	175,796	152,499

Quadro IV.17 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 28 dias

Argamassa	Provete	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	P.A [%]	Média	DP	MV [g/cm³]	Média	DP
NHL3,5_M	V11M	52,298	31,439	59,359	25,290	24,975	0,287	1873,138	1868,246	13,226
	V12M	68,678	41,153	77,656	24,595			1881,434		
	V13M	72,915	43,373	82,783	25,039			1850,165		
NHL3,5_2,5Mk_M	V21M	50,969	30,736	58,55	27,256	26,840	0,669	1832,494	1828,141	4,511
	V22M	68,228	40,6	77,883	25,897			1830,003		
	V23M	69,000	41,493	79,365	27,369			1821,926		
NHL3,5_5Mk_M	V31M	77,150	45,973	87,781	25,428	26,716	0,958	1845,341	1817,496	20,158
	V32M	69,703	41,571	80,105	26,994			1808,870		
	V33M	64,141	38,362	74,03	27,725			1798,279		
NHL3,5_S	V11S	62,862	37,765	71,378	25,335	24,629	0,502	1870,169	1869,258	6,898
	V12S	65,603	39,159	74,106	24,331			1877,214		
	V13S	73,009	43,2701	82,514	24,220			1860,391		
NHL3,5_2,5Mk_S	V21S	59,796	35,917	68,506	26,727	23,370	4,771	1834,852	1911,371	110,045
	V22S	69,916	41,714	75,539	16,624			2066,992		
	V23S	71,530	42,938	81,977	26,760			1832,270		
NHL3,5_5Mk_S	V31S	53,817	32,301	61,411	26,087	25,700	0,284	1848,746	1833,651	11,621
	V32S	83,944	49,551	95,662	25,413			1820,477		
	V33S	66,294	39,367	75,559	25,600			1831,731		
NHL3,5_H	V11H	62,025	37,169	70,527	25,487	25,442	0,032	1859,374	1860,631	1,766
	V12H	73,498	44,015	83,543	25,412			1859,391		
	V13H	62,657	37,578	71,208	25,427			1863,128		
NHL3,5_2,5Mk_H	V21H	45,744	27,44	52,324	26,443	26,104	0,452	1838,290	1834,048	10,545
	V22H	59,265	35,314	67,448	25,465			1844,308		
	V23H	48,671	28,985	55,734	26,405			1819,545		
NHL3,5_5Mk_H	V31H	59,371	35,246	67,246	24,609	25,097	0,376	1855,344	1857,671	8,064
	V32H	69,641	41,747	79,018	25,159			1868,504		
	V33H	69,843	41,713	79,483	25,523			1849,166		

M1 – massa seca; M2- massa hidrostática; M3 – massa saturada

Quadro IV.18 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 90 dias

Argamassa	Provete	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	P.A [%]	Média	DP	MV [g/cm³]	Média	DP
NHL3,5_M	V14M	65,958	39,775	74,675	24,977	24,395	0,435	1889,914	1903,315	10,970
	V15M	58,437	35,246	65,733	23,932			1916,784		
	V16M	68,909	41,493	77,699	24,278			1903,248		
NHL3,5_2,5Mk_M	V24M	66,380	40,247	76,18	27,273	26,860	0,309	1847,327	1853,387	4,565
	V25M	53,524	32,363	61,165	26,529			1858,343		
	V26M	34,156	20,67	39,088	26,778			1854,490		
NHL3,5_5Mk_M	V34M	62,602	37,584	71,53	26,301	26,361	0,738	1844,164	1846,943	21,735
	V35M	50,295	30,223	57,83	27,294			1821,821		
	V36M	65,627	39,545	74,549	25,489			1874,843		
NHL3,5_S	V14S	44,225	26,504	49,917	24,311	23,407	1,454	1888,908	1902,517	15,507
	V15S(a)	25,980	15,325	28,795	20,898			1928,731		
	V15S(b)	34,584	20,713	38,973	24,036			1893,976		
	V16S	65,789	39,585	74,239	24,384			1898,453		
NHL3,5_2,5Mk_S	V24S	70,812	42,648	80,589	25,769	25,400	0,366	1866,371	1873,620	11,590
	V25S	64,294	38,615	73,098	25,531			1864,513		
	V26S	56,584	34,1	64,039	24,901			1889,976		
NHL3,5_5Mk_S	V34S	91,567	55,147	104,125	25,640	25,833	0,306	1869,554	1864,430	13,490
	V35S	55,342	33,413	62,885	25,594			1877,782		
	V36S	53,948	32,399	61,624	26,265			1845,954		
NHL3,5_H	V14H	68,284	41,347	78,169	26,845	25,866	0,569	1854,435	1859,820	3,272
	V15H	75,759	45,477	86,208	25,654			1859,984		
	V16H(a)	27,396	16,435	31,147	25,496			1862,153		
	V16H(b)	28,492	17,092	32,388	25,471			1862,709		
NHL3,5_2,5Mk_H	V24H	73,753	43,952	84,454	26,421	26,222	0,154	1820,972	1832,145	8,936
	V25H	73,970	44,12	84,483	26,046			1832,619		
	V26H	75,177	45,071	85,865	26,200			1842,845		
NHL3,5_5Mk_H	V34H	101,549	60,913	116,48	26,870	25,870	0,719	1827,506	1839,763	9,268
	V35H	99,253	58,953	112,84	25,214			1841,873		
	V36H	90,727	54,202	103,246	25,526			1849,910		

M1 – massa seca; M2- massa hidrostática; M3 – massa saturada

Quadro IV.19 – Porosidade aberta e massa volúmica aparente aos 180 dias

Argamassa	Provete	M1 [g]	M2 [g]	M3 [g]	P.A [%]	Média	DP	MV [g/cm³]	Média	DP
NHL3,5_M	V17M	99,890	59,752	112,599	24,049	24,624	0,408	1890,174	1886,229	8,516
	V18M	52,698	31,817	59,639	24,948			1894,113		
	V19M	60,755	36,405	68,818	24,876			1874,402		
NHL3,5_2,5Mk_M	V27M	60,534	36,372	68,87	25,651	26,041	0,353	1862,699	1861,440	6,271
	V28M	38,678	23,352	44,053	25,965			1868,412		
	V29M	54,829	33,085	62,671	26,506			1853,208		
NHL3,5_5Mk_M	V37M	55,539	33,345	63,907	27,380	26,890	0,917	1817,257	1827,691	18,172
	V38M	28,679	17,488	32,963	27,683			1853,247		
	V39M	50,529	29,79	57,667	25,605			1812,570		
NHL3,5_S	V17S	47,903	28,743	54,016	24,188	23,611	0,414	1895,422	1894,774	2,726
	V18S	43,259	25,76	48,555	23,233			1897,741		
	V19S	47,487	28,256	53,366	23,413			1891,159		
NHL3,5_2,5Mk_S	V27S	42,169	25,417	47,716	24,876	23,630	2,249	1891,071	1883,495	11,625
	V28S	56,899	34,208	64,683	25,542			1867,071		
	V29S	26,981	15,642	29,9	20,473			1892,341		
NHL3,5_5Mk_S	V37S	48,766	28,974	55,204	24,544	25,412	0,764	1859,169	1851,430	14,567
	V38S	52,274	31,263	59,812	26,404			1831,027		
	V39S	50,832	30,459	57,728	25,289			1864,095		
NHL3,5_H	V17H	54,275	33,045	61,764	26,077	25,335	0,526	1889,864	1891,075	1,561
	V18H	52,796	31,884	59,77	25,009			1893,280		
	V19H	64,947	39,148	73,51	24,920			1890,082		
NHL3,5_2,5Mk_H	V27H	64,578	38,649	73,185	24,922	25,546	0,580	1869,875	1872,365	8,600
	V28H	64,626	39,034	73,338	25,396			1883,920		
	V29H	75,432	45,604	86,087	26,320			1863,301		
NHL3,5_5Mk_H	V37H	52,598	31,756	60,416	27,278	27,237	0,029	1835,241	1840,343	7,360
	V38H	48,523	29,441	55,659	27,218			1850,751		
	V39H	52,438	31,639	60,215	27,215			1835,036		

M1 – massa seca; M2- massa hidrostática; M3 – massa saturada

Quadro IV.20 – Condutibilidade térmica de provetes prismáticos aos 28 dias

Argamassa	Tijolo	28 dias							
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	Média [W/m.K]	DP
NHL3,5_M	V1M	1,050	0,947	0,945	0,983	0,903	0,764	0,932	0,088
NHL3,5_2,5Mk_M	V2M	0,524	0,496	0,380	0,454	0,371	0,518	0,457	0,062
NHL3,5_5Mk_M	V3M	0,443	0,563	0,536	0,644	0,538	0,712	0,573	0,086
NHL3,5_S	V1S	0,795	0,919	0,782	0,681	0,835	0,683	0,783	0,083
NHL3,5_2,5Mk_S	V2S	0,625	0,650	0,609	0,549	0,679	0,768	0,647	0,067
NHL3,5_5Mk_S	V3S	0,964	0,971	0,983	0,807	0,945	0,987	0,943	0,062
NHL3,5_H	V1H	0,880	1,090	1,050	1,010	1,000	0,996	1,004	0,065
NHL3,5_2,5Mk_H	V2H	0,804	0,667	0,834	0,772	0,432	0,676	0,698	0,134
NHL3,5_5Mk_H	V3H	1,180	1,060	1,190	1,070	1,030	1,010	1,090	0,070
NHL3,5_SP	V1SP	0,511	0,616	0,690	0,765	0,680	0,630	0,649	0,078
NHL3,5_2,5Mk_SP	V2SP	0,728	0,813	0,785	0,883	0,956	0,957	0,854	0,086
NHL3,5_5Mk_SP	V3SP	0,678	0,849	0,787	0,843	0,783	0,871	0,802	0,064

Quadro IV.21 – Condutibilidade térmica de provetes prismáticos aos 90 dias

Argamassa	Tijolo	90 dias							
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	Média [W/m.K]	DP
NHL3,5_M	V1M	0,968	0,936	1,023	0,782	0,999	0,838	0,924	0,087
NHL3,5_2,5Mk_M	V2M	0,780	0,924	0,796	0,649	0,882	0,572	0,767	0,123
NHL3,5_5Mk_M	V3M	0,929	0,631	0,593	0,842	0,715	0,675	0,731	0,118
NHL3,5_S	V1S	0,985	0,845	0,888	0,921	0,622	0,976	0,873	0,122
NHL3,5_2,5Mk_S	V2S	0,684	0,612	0,485	0,490	0,699	0,750	0,620	0,102
NHL3,5_5Mk_S	V3S	0,923	0,923	0,843	0,910	0,962	0,902	0,911	0,036
NHL3,5_H	V1H	1,080	1,070	1,010	0,928	0,937	0,901	0,988	0,070
NHL3,5_2,5Mk_H	V2H	0,877	0,764	0,741	0,525	0,803	0,631	0,724	0,115
NHL3,5_5Mk_H	V3H	1,070	0,881	0,918	0,948	0,866	0,904	0,931	0,067
NHL3,5_SP	V1SP	0,965	1,010	0,796	0,847	0,736	0,803	0,860	0,097
NHL3,5_2,5Mk_SP	V2SP	0,871	0,826	0,880	0,884	0,798	0,856	0,853	0,031
NHL3,5_5Mk_SP	V3SP	0,655	0,766	0,848	0,625	0,841	0,734	0,745	0,085

Quadro IV.22 – Condutibilidade térmica de provetes prismáticos aos 180 dias

Argamassa	Tijolo	180 dias							
		λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	Média [W/m.K]	DP
NHL3,5_M	V1M	0,857	1,040	0,951	0,763	0,934	1,130	0,946	0,119
NHL3,5_2,5Mk_M	V2M	0,622	0,806	0,726	0,722	0,753	0,709	0,723	0,055
NHL3,5_5Mk_M	V3M	0,961	0,939	0,688	0,936	0,833	0,879	0,873	0,093
NHL3,5_S	V1S	0,962	0,621	0,942	0,907	0,891	0,863	0,864	0,114
NHL3,5_2,5Mk_S	V2S	0,731	0,602	0,864	0,766	0,633	0,711	0,718	0,086
NHL3,5_5Mk_S	V3S	1,040	0,953	0,945	0,956	0,910	1,050	0,976	0,051
NHL3,5_H	V1H	0,895	1,110	1,050	1,020	0,981	1,010	1,011	0,066
NHL3,5_2,5Mk_H	V2H	0,745	0,713	0,788	0,811	0,863	0,899	0,803	0,064
NHL3,5_5Mk_H	V3H	1,070	0,857	0,798	0,835	0,808	0,903	0,879	0,092
NHL3,5_SP	V1SP	1,060	0,946	0,988	1,100	0,936	0,954	0,997	0,062
NHL3,5_2,5Mk_SP	V2SP	0,833	0,808	0,990	0,896	0,905	0,929	0,894	0,060
NHL3,5_5Mk_SP	V3SP	0,711	0,846	0,886	0,934	0,804	0,856	0,840	0,070

Quadro IV.23 – Absorção de água sob baixa pressão aos 28 dias

Argamassa	Tijolo	Tubo 1					Tubo 2					Tubo 3				
		5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora
NHL_M	V1M	1,1	3,0	4,1	7,6	13,3	2,4	3,7	4,5	6,7	14,5	2,0	3,0	3,8	5,5	8,6
NHL_2,5Mk_M	V2M	1,5	1,8	2,0	3,0	5,5	0,8	1,2	1,7	2,5	3,9	1,9	2,4	3,2	4,3	6,1
NHL_5Mk_M	V3M	0,6	1,0	1,3	2,1	3,2	3,4	4,8	6,2	9,3	14,1	0,9	1,3	1,7	2,6	3,9
NHL_S	V1S	1,4	2,4	3,2	5,3	8,7	1,1	2,2	3,1	5,3	9,7	1,9	3,0	4,0	7,2	12,0
NHL_2,5Mk_S	V2S	3,0	5,0	6,9	11,3	19,5	2,6	3,0	5,9	10,0	15,2	2,9	5,1	7,0	11,8	19,9
NHL_5Mk_S	V3S	1,9	2,7	3,4	5,3	8,3	1,1	1,8	2,4	4,2	6,7	2,4	3,4	4,1	6,1	9,5
NHL_H	V1H	6,9	9,1	10,8	14,3	19,5	6,3	8,1	9,6	12,6	18,1	5,2	6,8	8,1	11,2	15,7
NHL_2,5Mk_H	V2H	5,8	7,5	8,5	11,0	14,4	5,6	7,0	7,9	10,2	13,4	4,7	6,1	7,1	9,0	12,0
NHL_5Mk_H	V3H	0,2	0,4	0,5	0,8	1,4	0,5	0,8	1,1	1,8	3,0	0,7	1,0	1,2	1,6	2,7
NHL_SP	V1SP	1,8	3,0	3,8	6,2	10,2	2,0	3,2	4,3	6,9	11,5	1,7	3,0	4,2	7,2	11,9
NHL_2,5Mk_SP	V2SP	2,1	3,3	4,5	7,6	12,6	2,2	3,6	4,6	7,4	11,8	3,2	5,0	6,6	7,7	13,5
NHL_5Mk_SP	V3SP	2,7	4,0	5,1	7,8	12,3	4,0	6,0	7,7	12,1	19,6	2,5	4,0	5,3	8,7	15,0

Quadro IV.24 – Absorção de água sob baixa pressão aos 90 dias

Argamassa	Tijolo	Tubo 1					Tubo 2					Tubo 3				
		5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora
NHL_M	V1M	1,4	2,0	2,5	3,9	6,1	2,0	2,9	3,6	5,4	8,4	2,0	3,4	4,9	7,2	7,4
NHL_2,5Mk_M	V2M	1,7	2,2	2,6	3,5	5,0	1,1	1,4	1,7	2,4	3,4	1,4	2,0	2,4	3,2	4,9
NHL_5Mk_M	V3M	1,4	2,1	2,6	3,3	4,5	3,4	5,6	7,2	11,0	16,0	0,0	0,9	1,1	2,0	4,2
NHL_S	V1S	0,9	2,0	2,7	4,8	8,6	1,0	1,6	2,1	3,6	6,5	1,3	2,1	2,9	5,1	-
NHL_2,5Mk_S	V2S	3,4	5,6	-	-	-	3,0	5,1	7,0	11,9	20,4	3,3	5,4	7,4	9,1	21,6
NHL_5Mk_S	V3S	2,7	4,3	5,7	8,8	14,0	1,3	2,1	2,8	4,8	8,8	2,3	3,6	4,7	7,3	11,4
NHL_H	V1H	3,4	5,0	6,3	9,7	14,9	1,7	2,6	3,4	5,6	9,4	0,8	1,3	1,9	3,3	6,4
NHL_2,5Mk_H	V2H	2,0	3,8	4,6	6,3	9,4	0,6	0,5	4,3	6,0	8,5	2,5	3,5	4,5	6,4	9,5
NHL_5Mk_H	V3H	1,0	1,6	2,2	3,6	6,4	1,9	2,9	3,8	6,1	9,7	1,2	1,9	2,5	4,1	6,7
NHL_SP	V1SP	1,1	1,8	2,4	4,4	7,8	1,5	2,4	3,2	4,5	9,4	0,8	1,3	1,8	3,1	5,6
NHL_2,5Mk_SP	V2SP	2,7	4,3	5,6	9,2	11,7	3,2	5,0	6,8	11,9	23,3	2,9	4,8	6,6	11,3	19,3
NHL_5Mk_SP	V3SP	2,7	4,2	5,7	9,7	23,3	1,4	2,4	3,3	5,6	9,7	2,1	3,0	4,6	8,1	14,1

Quadro IV.24 – Absorção de água sob baixa pressão aos 180 dias

Argamassa	Tijolo	Tubo 1					Tubo 2					Tubo 3				
		5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora	5 min	10 min	15 min	30 min	1 hora
NHL_M	V1M	1,5	2,2	2,8	4,3	6,8	2,6	3,5	4,2	5,7	8,3	1,5	2,2	2,7	2,9	5,8
NHL_2,5Mk_M	V2M	1,8	2,4	3,8	3,9	6,2	1,5	2,1	2,7	4,2	6,4	2,2	2,9	3,3	4,5	6,3
NHL_5Mk_M	V3M	1,2	1,7	2,1	3,0	4,8	3,6	5,7	7,2	10,5	13,2	2,1	2,8	3,3	5,0	9,9
NHL_S	V1S	2,2	3,2	4,2	6,9	11,3	1,8	3,3	3,7	6,6	10,0	1,5	2,2	2,9	5,0	9,0
NHL_2,5Mk_S	V2S	3,5	5,6	11,9	14,5	25,3	4,0	7,8	15,1	18,6	26,4					
NHL_5Mk_S	V3S	2,0	3,0	4,0	6,5	10,8	2,9	4,4	5,7	9,0	14,5	2,5	3,7	4,8	7,0	10,3
NHL_H	V1H	2,9	4,5	5,9	9,3	15,4	2,5	3,8	4,9	8,1	13,4	1,6	2,7	3,6	6,0	11,5
NHL_2,5Mk_H	V2H															
NHL_5Mk_H	V3H	1,9	3,2	4,5	7,2	11,9	1,6	2,8	3,9	7,4	12,3					
NHL_SP	V1SP	1,9	3,0	3,9	6,7	12,0	2,5	3,9	5,4	9,6	17,2	1,8	3,0	4,0	6,8	12,8
NHL_2,5Mk_SP	V2SP	3,2	5,1	6,7	11,0	23,0	2,9	4,6	6,7	11,0	19,2	2,9	5,0	6,7	11,5	16,6
NHL_5Mk_SP	V3SP	1,6	2,7	3,7	6,4	12,4	1,8	3,1	4,2	11,4	13,4					